



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**POROVNÁNÍ MOŽNOSTÍ VÝROBY OZUBENÝCH
KOL KOVOVÝCH A PLASTOVÝCH**

COMPARISON OF PRODUCTION POSSIBILITIES GEARS PLASTIC AND METAL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Květoun

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Bohumil Kandus

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jan Květoun**
Studijní
program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Bohumil Kandus**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Porovnání možností výroby ozubených kol kovových a plastových

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obsahem závěrečné bakalářské práce je komplexní studium, rozbor a vlastní hodnocení a porovnání možností výroby ozubených kol z technických plastů a ozubených kol kovových. Na základě této rešerše porovnat možnosti výroby zadaného ozubeného kola s pastorkem.

Cíle bakalářské práce:

Vytvořit ucelený přehled dostupných technologií pro výrobu ozubených kol kovových a plastových se zaměřením na technické a ekonomické aspekty výroby a u zadaného ozubeného kola provést variantní návrh technologického postupu výroby v případě kovového a plastového provedení kola včetně technicko-ekonomického zhodnocení.

Seznam literatury:

SOVA, Miloš a Josef KREBS. Termoplasty v praxi. 1. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. ISBN 80-8622--15-7.
MORAVEC, Vladimír. Konstrukce strojů a zařízení II: čelní ozubená kola. 1. Ostrava: Montanex, 2007. ISBN 80-7225-051-5.
ERHARD, Gunter. Designing with Plastics. 1. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006. ISBN 978--446-22590-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška,
CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický,
Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

KVĚTOUN Jan: Porovnání možností výroby ozubených kol kovových a plastových.

Tato práce se zaměřuje na porovnání technologií výroby ozubených kol plastových a kovových. Je zde uveden princip jednotlivých technologií, jejich popis a vhodnost použití, či jejich výhody a nevýhody. U kovových ozubených kol je hlavní zaměření na obráběcí technologie, jako je frézování, obrážení nebo broušení. Popisovanou technologií pro plastová ozubená kola je především vstřikování. V praktické části se práce zabývá teoretickou výměnou plastového kola za kovové kolo za použití výpočtů a informací z uvedené literatury. Ozubené kolo je z motocyklu ČZ 175/453.

Klíčová slova: Ozubené kolo, plast, kov, vstřikování, obrábění

ABSTRACT

KVĚTOUN Jan: Comparison of production possibilities gears plastic and metal

This project is focused on comparison technologies of making cogwheels from plastic and metal. Inside are described principles, descriptions of technologies and appropriate usage or advantages and disadvantages. Mentioned technologies of making metal gears are primarily machining for example milling, slotting or grinding. Making of plastic gears is primarily focused on injection moulding. Practical part of this thesis is focused on exchange metal cogwheel with plastic cogwheel with helping calculations and information from resources. Exchanged cogwheel is from motorcycle ČZ 175/453.

Keywords: Cogwheel (gear), plastic, metal, injection moulding, machining

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KVĚTOUN, Jan. *Porovnání možností výroby ozubených kol kovových a plastových*. Brno, 2017. 40s, 6 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 23.5.2017

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Bohumilu Kandusovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD [1, 2]	9
1 Rozbor zadání [5].....	10
1.1 Přehled výrobních technologií výroby ozubených kol [2, 6, 7, 8]	10
2 Přehled a rozbor výrobních technologií ozubeného kola [6, 1].....	11
2.1 Technologie výroby kovových ozubených kol [5, 25].....	11
2.1.1 Technologie kování [11, 12]	12
2.1.2 Technologie odlévání [9, 10]	13
2.1.3 Technologie svařování a aditivní technologie [15, 16, 17, 18].....	14
2.1.4 Technologie stříhání a technologie řezání různými druhy paprsků [20, 21]	15
2.1.5 Technologie obrábění kovových kol [1, 6]	16
2.2 Technologie výroby plastových ozubených kol [26, 8]	24
2.2.1 Technologie obrábění plastových kol [8]	24
2.2.2 Technologie rapid prototyping (3D-tisk) [18, 27]	25
2.2.3 Technologie vstřikování [8, 29, 36].....	26
3 Návrh ozubeného kola [5, 26].....	30
3.1 Historie ozubeného kola [28, 34]	30
3.2 Geometrie profilu boku zubu ozubeného kola [23]	31
3.3 Materiály pro výrobu ozubených kol [8, 30, 32, 33]	31
3.4 Hranice použití plastových kol [8]	34
3.5 Využití recyklovaných materiálů [35]	34
3.6 Typ navrhovaného ozubeného kola [1, 8, 37].....	35
3.7 Vyhodnocení zaměnitelnosti plastového kola za kovové [2, 39].....	37
4 Porovnání technologií z technického a ekonomického hlediska	38
4.1 Porovnání ozubených kol z materiálového hlediska [1, 2, 28, 34, 38]	39
5 Závěry	40

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů

Seznam obrázků

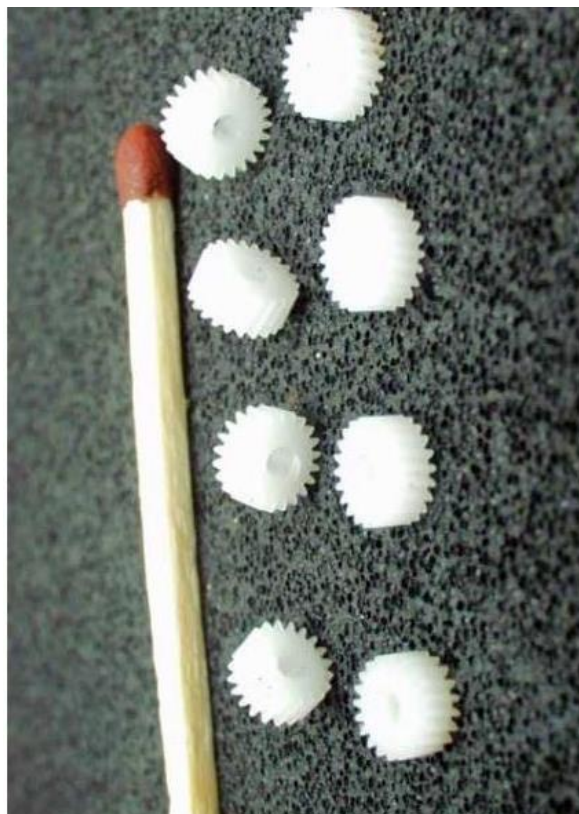
Seznam příloh

ÚVOD [1, 2]

Ozubené kolo může být mnohými chápáno jako symbol strojírenství. Je to základní prvek, který realizuje přenos a transformace mechanické energie a pohybu. Jeho aplikace se v dnešní době nalézají téměř ve všech odvětvích, na které si lze vzpomenout. Převodovky v osobních automobilech, nákladních vozech, závodních sportovních vozech nebo zaoceánských lodích mají jedno společné. Všechny obsahují kovová ozubená kola nejrůznějších tvarů a velikostí. V tiskárnách, modelářských autíčkách nebo stahovacích mechanismech oken automobilů se zase objevuje velké množství plastových ozubených kol. Význam ozubených kol je obrovský, a proto se v této oblasti stále inovuje a zkoumá kvalita, technologie a ekonomická sféra výroby. V některých oblastech se v budoucnu nejspíše budou zaměňovat stávající kovová kola za kola plastová. Význam plastů a jejich použití ve strojírenství a jiných průmyslových odvětvích se vzhledem k současnému stavu ve společnosti stal nedílnou součástí každodenního života. Plasty jsou využívány z nejrůznějších důvodů, například díky jejich poměrně lehké hmotnosti oproti kovům, izolační schopnosti využívané jako obaly vodičů, chemické odolnosti, umožňující použití v nepříznivých podmínkách aj. Předností kovů je především jejich velká pevnost, tvrdost při zachování houževnatosti. Další výhodou je rozměrová stálost při vyšších teplotách. Avšak teprve budoucnost ukáže, které technologie a materiály převáží a budou nadále udávat směr novodobých ozubených kol. Vzhledem k tomu, že se za poslední desetiletí se vývoj významně urychlil, lze předpokládat, že i v následujících letech bude tento trend pokračovat. Kovové ozubené kolo se šípovým ozubením, viz obr. 1, ozubená plastová šneková kola, viz obr. 2.



Obr. 1 Kolo se šípovým ozubením (60 t) [3]



Obr. 2 Šneková ozubená kola, 26 zubů [4]

1 Rozbor zadání [5]

Základní myšlenkou při vytváření této práce je vytvořit ucelený přehled dostupných technologií výroby ozubených kol plastových a kovových, zaměřit se na jejich hodnocení z technického a ekonomického hlediska a porovnat možnosti vhodnosti použití s ohledem na případnou zaměnitelnost kovových kol plastovými.

Ozubené kolo slouží k přenosu mechanické energie z jednoho hřídele na druhý. Při jeho konstrukci je vždy třeba brát zřetel na jeho budoucí funkci a podmínky, ve kterých bude fungovat. Proto nelze předpokládat, že jedna jediná technologie nebo jediný materiál bude vyhovující pro všechny oblasti použití. Někdy se ani technologie ozubeného soukolí nedá považovat za nejlepší řešení, viz například řemenový převod u pohonu alternátoru u automobilu nebo řetězový převod jízdního kola. Tato práce se zaměřuje na aplikace ozubení, které jsou řadou let výzkumu, zkušeností a praxe ověřené a neuvažuje použití jiných druhů mechanických převodů.

Důležitou součástí zhodnocení technologií je i ekonomičnost výroby, jejíž nejhlavnější aspekty jsou rentabilita a zisk. Vždy je důležité si uvědomit, za jakých podmínek bude ozubené kolo vyráběno. Mezi tyto podmínky patří například přehled o stávajícím strojovém parku ve firmě, perspektiva budoucích vztahů se zákazníkem, možnost budoucí modifikace ozubených kol na přání zákazníka, všeobecný přehled o novinkách na trhu nebo přibližné cenové relace strojů a nástrojů.

1.1 Přehled výrobních technologií výroby ozubených kol [2, 6, 7, 8]

V dnešní době jsou ve středním a těžkém průmyslu nejrozšířenější kovová ozubená kola. Kovovými koly jsou myšlena převážně ocelová a litinová kola, ale své zastoupení mají i slitiny jiných neželezných kovů, například mosazné a bronzové. Pro jejich výrobu se obvykle nejčastěji používá třískové obrábění, mezi něž patří odvalovací frézování, obrážecí frézování, frézování dělicím způsobem, protahování a broušení. Odvalovací frézování probíhá za pomoci odvalovacích fréz, které mohou být jak monolitní, tak i s vyměnitelnými břitovými destičkami. Obrážecí frézování zastupují metody Maag (obrážení hřebenovým nožem) a Fellows (obrážení rotačním tvarovým nožem). Jinými metodami výroby kovových kol je například kování, odlévání, svařování, přesné stříhání a řezání různými druhy paprsků. Je důležité si uvědomit, že po kovacích a odlévacích operacích (popřípadě i jiných) většinou následuje obrábění kvůli dosažení požadované přesnosti a drsnosti povrchu. Přesné stříhání lze uplatnit jen do omezené tloušťky plechu. Svařování ozubených kol do sebe zahrnuje více komponent, které jsou pouze svařeny k sobě. Svařování slouží především k opravě poškozených ozubení nebo k vytvoření dočasně fungujícího ozubeného kola.

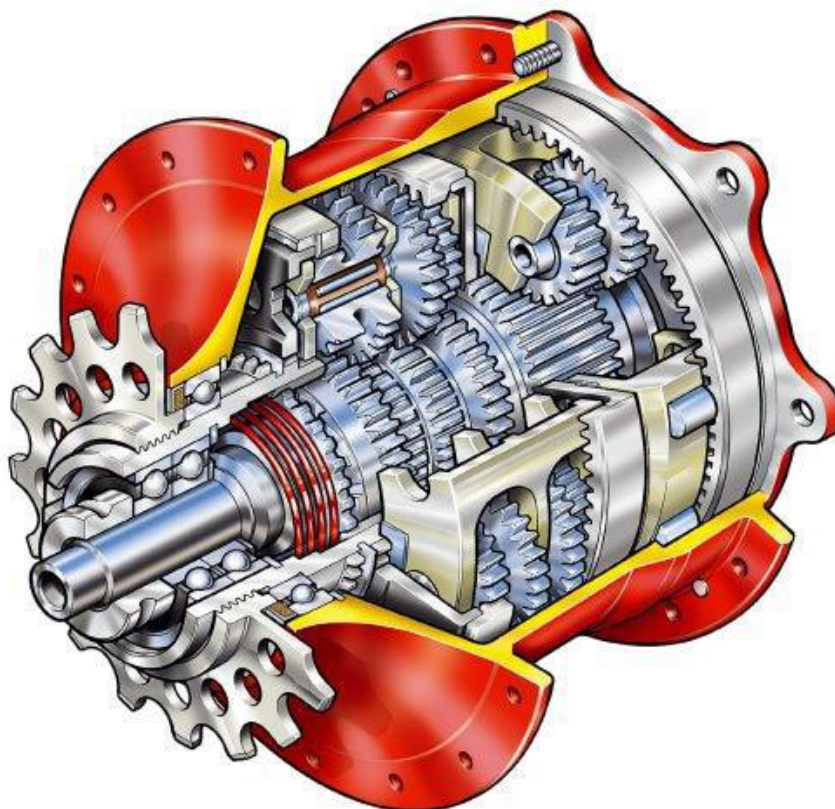
U plastových kol lze také využít technologii obrábění. Obráběcí síly budou nižší z důvodu nižší pevnosti a tvrdosti plastů. Technologie obrábění u plastů se využívá zejména pro rozměrnější ozubená kola a nižší výrobní série. Je třeba dbát na vytvoření správných technologických podmínek, jako je například řezná rychlost, protože například při příliš vysoké řezné rychlosti může z důvodu špatného odvodu tepla docházet k plastifikaci materiálu a tím znehodnocení jeho vlastností a struktury. V dnešní době lze jak u plastů, tak kovů využít technologii rapid prototyping, tedy 3D tisk. Tato technologie se používá pro vytváření jak funkčních, tak i nefunkčních prototypů a udává konstruktérovi představu o tom, jak bude výsledná součást vypadat, případně umožňuje získat informace o tom, jak součást pro budoucí sérii vylepšit. Oproti výrobě kovových kol se zde objevuje technologie vstřikování, která je využívána především u velkých sérií a méně rozměrných ozubených kol, nicméně ani velká kola nejsou výjimkou. Jedná se o nejrozšířenější výrobu plastových ozubených kol. Pro vytvoření lepší představy o jednotlivých výrobních technologiích budou v následujících podkapitolách výše zmíněné technologie blíže rozebrány. Největší zaměření bude na návrh ozubeného plastového kola pomocí technologie vstřikování.

2 Přehled a rozbor výrobních technologií ozubeného kola [6, 1]

Výroba ozubeného kola je jednou z velmi specifických strojírenských operací. Často je nutné mít k dispozici drahý stroj i nástroj. Velký důraz je kladen na přesnost a toleranci ozubení, protože i malé odchylky na vyrobené součásti mohou mít za následek například hlučný chod, nadměrné opotřebení, nebo může dojít k předčasnému selhání. Proto je třeba u budoucí výroby vždy vědět, k čemu bude dané kolo sloužit a v jakých podmínkách bude pracovat. K tomu je nutné adekvátně vybrat materiál a danou technologii, i s ohledem na velikost série a ekonomičnost celého procesu.

2.1 Technologie výroby kovových ozubených kol [5, 25]

Mezi ozubená kola kovová se řadí především ocelová kola. Jinými významnými kovovými materiály jsou například šedá a tvárná litina, mosaz a bronz. Uplatnění kovových kol se táhne napříč strojírenstvím. V motorových vozidlech plní důležitou funkci v převodových skříních, v nemotorových vozidlech, například u jízdního kola, zase figurují v podobě řetězového kola, které přenáší sílu lidských nohou. Pokud je kolo vyrobeno za správných technologických podmínek a jeho údržba není zanedbávána, pak může mít ozubené kolo životnost až několik desetiletí. Planetová převodovka jízdního kola ukazuje možnost využití kovových ozubených kol, viz obr. 3. Velikost ozubených kol není teoreticky limitována. Lze vyrábět kola od modulu 0,05 mm, často různými druhy frézování, při speciálních úpravách i nižší až do teoreticky libovolně velkého modulu, kdy je ozubené kolo vyrobeno z několika svařených segmentů nebo odléváním.



Obr. 3. Planetová převodovka v náboji Rohloff SpeedHub 500/14 [5]

2.1.1 Technologie kování [11, 12]

Pro výrobu ozubených kol lze použít technologii kování. Využívá se především při sériové výrobě pro ušetření nákladů a zlepšení pevnostních vlastností ozubeného kola. V zásadě lze výrobu kováním rozdělit na tři možné způsoby a využití.

- Kování polotovaru za tepla

Při takzvané výrobě ozubeného kola kováním se nerozumí vykování hotového výrobku, ale přiblížení tvaru výkovku budoucímu tvaru ozubeného kola. Po kování musí vždy následovat ještě obráběcí operace, která vytvoří požadovaný tvar zubů. Obráběcí operace jsou ale méně časově náročné než u obrábění z plné tyčoviny, protože díky předpřipravenému tvaru z kování se odebírá menší část materiálu. Další výhodou kování je zlepšení mechanických vlastností. To nastává v důsledku rekrytalizace a vytvoření vláken v oceli. Vláknata vznikají díky vměstkům. Vměstky jsou nejčastěji sloučeniny síry a fosforu. U celobrábeného ozubeného kola jsou vlákna přerušena, naopak u kovaného kola je průběh vláken příznivější, viz obr. 4.



Obr. 4 Průběh vláken – obráběná součást (vlevo), kovaná součást (vpravo) [12]

Výroba probíhá na svislých kovacíh lisech nebo na bucharech. Lis působí klidnější silou plynule. Buchar pracuje rázy, k vykování je potřeba více úderů. Lis je možné zapracovat do automatizované linky, kdežto buchar převážně ne. U lisu se okuje vtlačují do materiálu, což zhoršuje kvalitu povrchu, u bucharu okuje opadávají, kvalita povrchu je lepší. Buchary bývají obecně levnější než lisy. Výsledný výkovek může vypadat takto, viz obr. 5.



Obr. 5 Výkovek kovaný na lisu [13]

- Kování kyvnou zápustkou

Princip tváření kyvnou zápustkou spočívá v tvářecí síle, která působí pouze na část povrchu součásti. Vznikající valivé tření je na rozdíl od vlečného tření vznikajícího při klasickém lisování za studena, menší. Materiál teče bez většího odporu v radiálním směru. Kývavý pohyb, který koná horní zápustka, umožňuje velký stupeň přetvoření bez vzniku trhlin v součástce. Kování kyvnou zápustkou je jednostupňový tvářecí proces. Jedním zdvihem

beranu lisu je za několik cyklů kývavého pohybu dosaženo požadované přetvoření. Jako polotovary je zapotřebí rotační výkovky.

Technologie kování kyvnou zápustkou se využívá například při výrobě kuželových ozubených kol. Je důležité, že po tomto typu kování již nemusí následovat obráběcí operace. Záleží ovšem na kvalitě provedení výrobních komponent. Tato technologie spadá do kategorie tváření za studena, tedy tváření při okolní teplotě. Dosahovaná přesnost může být až IT 7. Zároveň se jedná o bezotřesovou technologii, kterou lze proto zařadit do automatické linky. Například u bucharů toto možné není, protože rázy by mohly například ovlivnit přesnost obráběcích strojů v blízkosti. Síly potřebné k vytvoření výsledného tvaru jsou až desetkrát nižší než u lisování za studena. To je dáno menší stykovou plochu mezi nástrojem a součástí. Použití je vhodné pro větší série, ale i u menších sérií lze tváření kyvnou zápustkou využít, protože na výrobu zápustek nejsou kladeny mimořádné požadavky. Kyvnou zápustkou lze vytvářet rotačně symetrické součásti.

- Přesné kování

Předem je třeba říci, že přesné kování nestojí jako samostatná technologie, nýbrž je umístěna v řadě jiných operací. Pro výrobu dostatečně přesných součástí je nejlepší využít kování za polohřevu a kování za studena. Často je předtím využito jako polotovar výkovek kovaných za tepla. Přesné kování je považováno za špičkovou tvářecí technologii. Umožňuje vytvářet součásti na hotovo o přesnosti IT8 při velmi dobré kvalitě povrchu. Je ho využívání hlavně u velkých sérií. Při výrobě diferenciálních kol proběhne nejprve kování za tepla, kde se vytvoří tvar až z 98 %. Výsledného tvaru se dosáhne na kalibrovacím lisu. Při správném uspořádání výroby lze dosáhnout až 120 výrobků za minutu, tj. dva výrobky za sekundu.

2.1.2 Technologie odlévání [9, 10]

Výroba ozubených kol odléváním principiálně souvisí s technologií kování. Jedná se také o technologii, která nevytváří konečný tvar kola, ale je za ní nutno zařadit obráběcí operace. Jsou případy přesného lití, kdy se dá ovšem odlít ozubené kolo bez nutnosti dalšího nebo jen malého opracování. Existují různé varianty metod odlévání. Za základní rozdělení by se dalo považovat gravitační lití a lití za zvýšených sil (např. nízkotlaké lití nebo odstředivé lití). Technologie odlévání lze dále dělit podle netrvalých (po odlití se forma zničí) a trvalých forem (například lití neželezných slitin do ocelových forem). Oproti kování mají odlitky horší mechanické vlastnosti, ze které může litá struktura, která neobsahuje usměrněná vlákna, která by je zlepšila. Odléváním lze vyrobit více kusů najednou. Jednotlivé kusy spojuje vtoková soustava. Odlitky musí být nálitkováné, aby nedocházelo k nežádoucím vadám nebo nedostatečným mechanickým vlastnostem. Velikost odlévaných kol je rozmanitá. Záleží na použité odlévací technologii. Lze odlévat malá i velmi rozměrná kola. KRÁLOVOPOLSKÁ SLÉVÁRNA s. r. o. vyrábí například velké ozubené kolo o průměru 1262 mm a surové hmotnosti 1540 kg. Hrubá hmotnost odlitku (po odstranění nálitků, vtokové soustavy a začištění povrchu) je potom 820 kg. Příklad odlévaných ozubených kol, viz obr. 6.



Obr. 6 Soustava odlévaných ozubených kol [14]

2.1.3 Technologie svařování a aditivní technologie [15, 16, 17, 18]

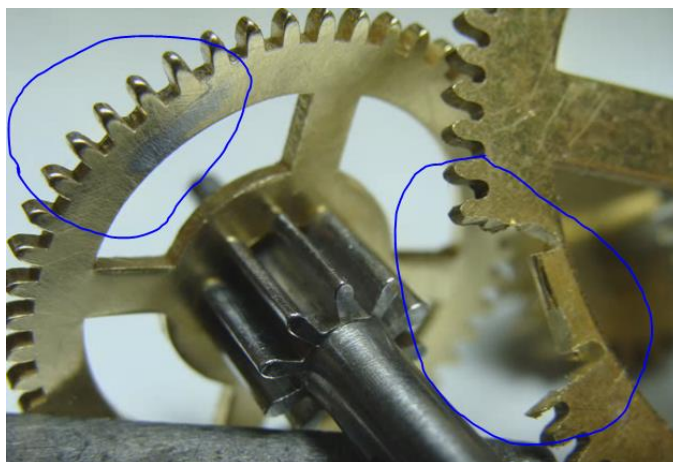
Svařování je technologií, která nevytváří nová ozubená kola, ale slouží k renovacím a opravám již stávajících kol. Mohou se použít dva postupy, jak kolo opravit.

U prvního postupu se vybrousí část poškozeného ozubení, připraví se tvarovaná záplata, která se přivaří do vybroušené části a následně se dofrézuje chybějící ozubení a zarovná povrch, viz obr. 7.

Druhý způsob využije pouze navaření materiálu na stávající poničené zuby a poté je doporučeno doobrobit požadovaný tvar, návar je znázorněn, viz obr. 8.

Při výrobě nových kol může být například věnec s ozubením navařen na náboj, ale k těmto aplikacím dochází jen ve výjimečných případech, například když se ví, že ozubené kolo bude pracovat jen krátkou dobu, než se přejde na jiné s delší předpokládanou trvanlivostí.

Technologie rapid prototyping, též nazývaná 3D tisk, je aditivní technologií známou již z osmdesátých let minulého století. Princip této technologie spočívá v nanášení tenkých vrstev na sebe, které jsou vzájemně spojené např. tavením nebo lepením. Existují různé metody výroby jako např. SLS (Selective laser sintering), SLA (Stereolitography), FDM (Fused deposition modeling), DMLS (Direct metal laser sintering), viz obr. 9, a jiné. Nevýhodou této technologie jsou vyšší výrobní časy a problematičnost sériové výroby. Oproti obrábění, kde se materiál ubírá z polotovaru, se součást vyrábí přidáváním jednotlivých vrstev na sebe. U některých metod se může jednat o téměř bezodpadovou technologii, u některých metod jsou zapotřebí dočasné podpory, které nejsou součástí finálního výrobku. Tato technologie je uplatňována při výrobě prototypů, v kusové a malosériové výrobě. Levnější stroje používají jako přídavný materiál termoplast, dražší kov.



Obr. 7 Kolečko do hodin, (vpravo před, vlevo po) [15]



Obr. 8 Zavařené zuby [16]



Obr. 9 Součást vyrobená technologií DMLS [17]

2.1.4 Technologie stříhání a technologie řezání různými druhy paprsků [20, 21]

Tyto technologie byly umístěny do stejné kategorie z důvodu podobného principu výroby. Využívají se pro výrobu ozubených a řetězových kol z plechu. U stříhání lze mluvit o postupovém a přesném stříhání. Do paprskových technologií se řadí paprsek vody, laseru, plazmy a elektronů. Všechny paprskové technologie mají poměrně vysoké investiční náklady a jejich využití pro sériovou výrobu kol není zpravidla ekonomicky výhodné.

- Stříhání

Princip stříhání spočívá v oddělování části materiálu působením protilehlých řezných hran způsobujících v řezné rovině smykové napětí. U postupového stříhání zajede střižník do střižnice a prostříhne plech, který je umístěn mezi střižníkem a střižnicí. Výstřižek je vyroben ve více krocích. Přesné stříhání vyrábí součást na jeden zdvih. Kvalita stříhaného povrchu u postupového stříhání dosahuje IT 11 až IT 9. U přesného stříhání speciálně až IT 6. Stříhání lze rozdělit na dva typy. Vystřihování a děrování. Vystřihování slouží k výrobě obrysů a výsledná součást propadá střižnicí, u děrování propadá střižnicí odpad. U řetězových kol se děrováním vyrábí například odlehčovací otvory, vystřihováním pak vnější tvar kola.

- Řezání různými druhy paprsků

Řezání vodním paprskem je technologie, jejíž princip je založen na rozrušení povrchové vrstvy a průniku paprsku vody materiálem. Vodní paprsek může obsahovat abrazivo. Rychlost paprsku dosahuje nadzvukové rychlosti. Tlak, pod kterým je voda stlačována, se pohybuje okolo 400 MPa. Přesnost výstřižku závisí na šířce vodního paprsku. Výhodou této metody je nízká tepelně ovlivněná oblast. Nevýhodou může být nižší produktivita oproti stříhání, nutnost kvalitního těsnění a jiné.

Řezání plazmovým paprskem funguje na principu dynamického a tepelného účinku paprsku. Plazma je stav plynu, který vzniká jeho ionizací při teplotách nad 20 000 °C nebo jako elektrický výboj mezi katodou a anodou. Materiál se taví a je z místa řezu odfukován. Výhoda této technologie je například dobrá možnost automatizace a vysoká řezná rychlost. Nevýhodou je velká hlučnost a možnost řezat pouze materiály elektricky vodivé. To ale u výroby *kovových* ozubených kol není předmět k řešení.

Řezání laserovým paprskem se vyznačuje výbornou kvalitou řezu a vyšší řeznou rychlostí než u vodního paprsku. Principem je přeměna světelné energie na tepelnou energii. Soustavou jednotlivých částí, jako je laserová hlavička, aktivní prostředí, soustava čoček, polopropustné zrcadlo, chladicí systém atd., je potřeba dosáhnout monochromatického paprsku o vysoké výstupní intenzitě, který rozruší povrch materiálu a projde skrz. Laserem lze řezat omezené tloušťky v závislosti na druhu materiálu. U konstrukční oceli je to 25 mm, korozivzdorné oceli 15 mm a hliníku 10 mm. Hodnoty jsou pouze orientační a při určitých konfiguracích lze dosáhnout i větších tloušťek. Se zvyšující se tloušťkou klesá kvalita řezné plochy v důsledku tepelného ovlivnění laserem. Řezání ozubeného kola z tenkého plechu je znázorněno, viz obr. 10.



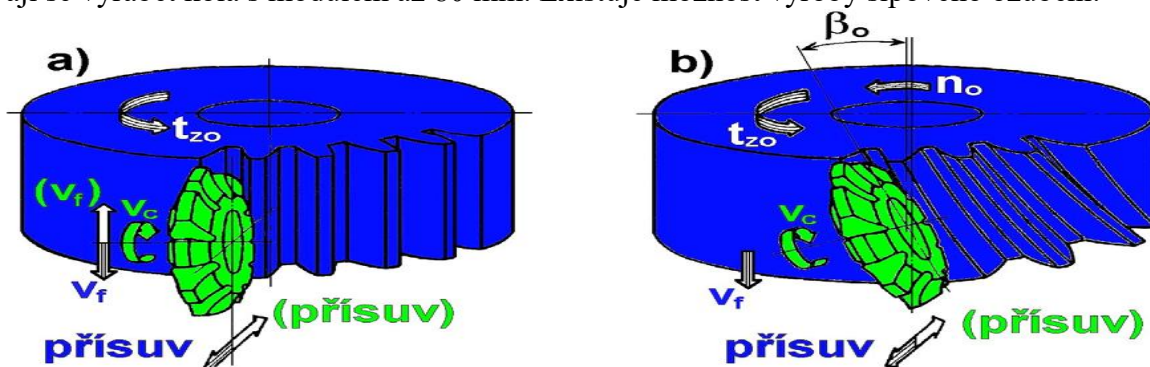
Obr. 10 Řezání ozubeného kola laserovým paprskem [19]

2.1.5 Technologie obrábění kovových kol [1, 6]

Při výrobě kovových ozubených kol má jednoznačně největší podíl výroby obráběcí technologie. Z nejpoužívanějších technologií je to frézování a obrážení. U určitých typů ozubení lze použít i soustružení (například při výrobě šneků).

- Frézování dělicím způsobem

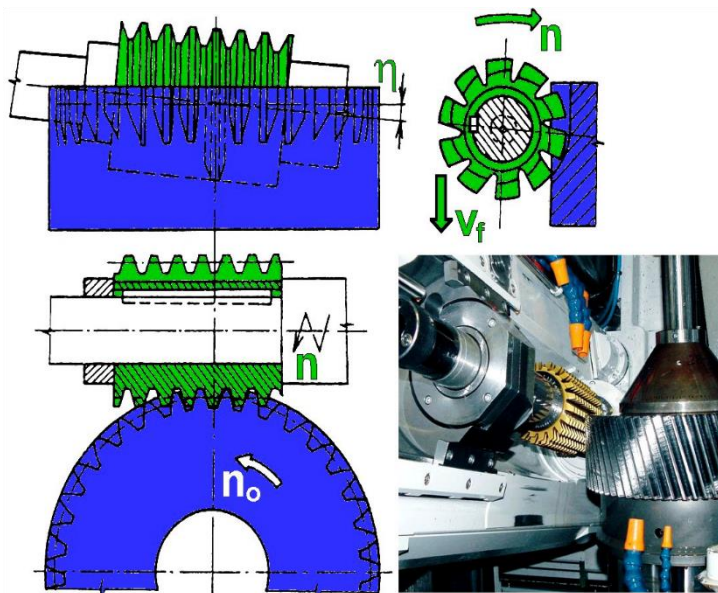
Frézování dělicím způsobem je jednou ze starších metod výroby ozubení. Postup frézování je takový, že se nejprve vyfrézuje jedna zubová mezera, poté se obrobek pomocí dělicího přístroje pootočí a vyfrézuje se druhá zubová mezera. Takto se frézuje, dokud nevznikne kompletní ozubení. Výhodou této metody je nízká cena nástroje, možnost použití univerzálních frézovacích nástrojů. Nevýhodou je relativně nízká přesnost ozubení, dlouhý výrobní čas z důvodu neplynulosti obráběcího procesu. Schéma procesu, rychlosti a přísuvy, viz obr. 11. Dají se vyrábět kola s modulem až 80 mm. Existuje možnost výroby šípového ozubení.



Obr. 11 Frézování čelního ozubení kotoučovou frézou: a) přímé zuby b), šikmé zuby [6]

- Frézování odvalovacím způsobem

Frézování odvalovacím způsobem je založeno na záběru válcového šneku s ozubeným kolem. Nástrojem je odvalovací fréza, která může být buď monolitní nebo s vyměnitelnými břitovými destičkami. Spirálu šneku přerušují drážky, které vytvářejí čelní plochy břitů nástroje na základním hřebenu. Boky zubů a hlava jsou podsoustruženy nebo podbroušeny, aby byly na hlavním i vedlejším hřbetu vytvořeny požadované úhly hřbetu. Rotace frézy způsobuje řezný pohyb, obrobek rotuje tak, že za jednu otáčku frézy se pootočí o jednu zubovou rozteč. Tím se plynule frézují všechny zuby. K vytvoření ozubení po celé šířce kola se

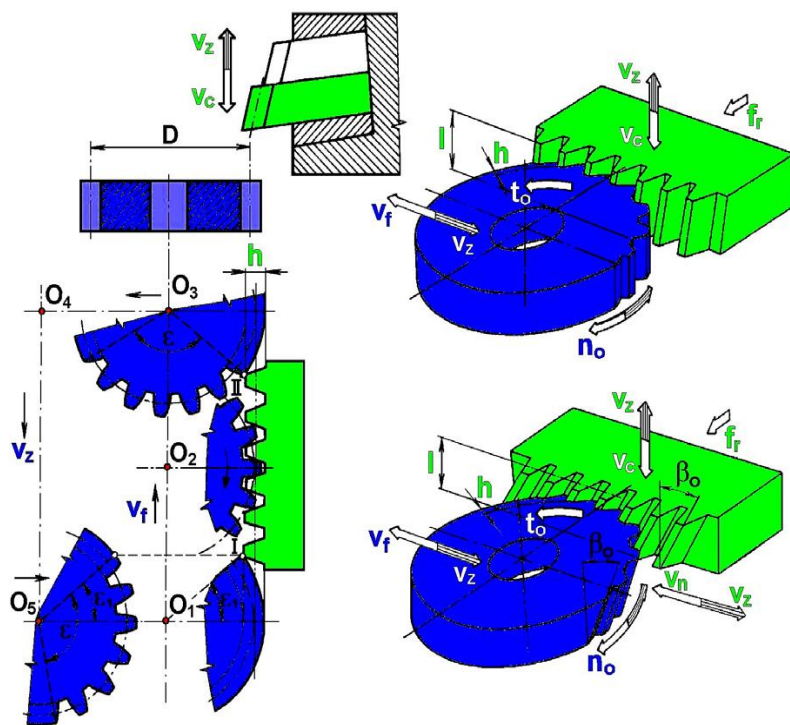


Obr. 12 Odvalovací frézování [6]

musí fréza pohybovat současně ve směru obráběných zubů. Posuv frézy může být buď nesousledný, když se fréza posouvá ve smyslu rotace nebo sousledný, když se pohybuje opačně. Jedna odvalovací fréza dokáže obrobit ozubená kola stejného modulu s libovolným počtem zubů libovolného sklonu. Nástroj se otáčí otáčkami n a posouvá rychlostí v_f . Obrobek koná rotační pohyb n_o . Schéma odvalování, viz obr. 12. Dají se vyrábět kola do modulu 30 mm a průměry kol do 7 m.

- Obrázení hřebenovým nožem

Obrázení pomocí hřebenového nože je založeno na principu záběru ozubeného hřebene a ozubeného kola. Nástroj je ve směru kolmém na osu (radiálním) nastavený na hloubku h a koná přímočarý vratný pohyb, kde l je délka zdvihu, v_c je střední hodnota řezné rychlosti a v_z je střední hodnota rychlosti zpětného pohybu. Obrobek koná otáčivý pohyb n_o a posuvný pohyb v_f . Obrobí se část segmentu ozubení, což znázorňuje kruhová výseč s úhlem ε v poloze O_3 a obrobek se přesune do polohy O_5 , kde se nastaví úhel ε_I a znovu



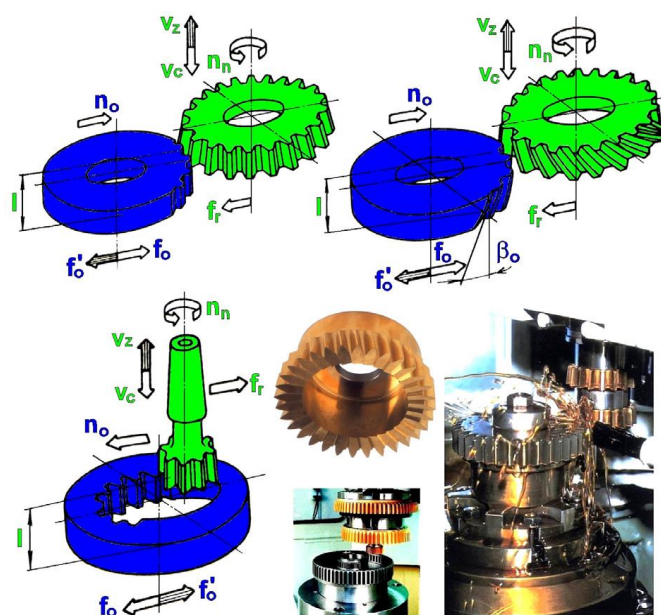
Obr. 13 Kinematika pohybů čelního obrázení metodou Maag [6]

přisune do polohy O_1 , kde začne nůž znovu zabírat. Při postupném obrábění jednotlivých segmentů se obrobí celé ozubení daného kola. Kinematika pohybů je znázorněna, viz obr. 13.

Jedním nástrojem daného modulu lze vyrábět kola s jakýmkoliv počtem zubů, s přímými i šikmými zuby. Výroba šípového ozubení probíhá na strojích, které jsou osazeny dvěma protiběžnými smykadly. Obrábění hřebenovým nožem se v provozních podmínkách nazývá Maag. Dají se vyrábět kola do modulu 50 mm a průměry kol do 15 m.

- Obrázení kotoučovým nožem

Technologie obrázení kotoučovým nožem je velmi podobná obrázení hřebenovým nožem. Je založena na principu záběru dvou ozubených kol bez vůle. Nástroj s obrobkem se po sobě odvalují a zároveň se obrobek sune blíž k nástroji, aby došlo k obrázení ozubení. Kola do modulu 15 mm. Nástroj je upnutý ve smykadle a koná přímočarý vratný pohyb ve směru své osy, kde l je délka zdvihu, v_c je střední hodnota řezné rychlosti a v_z je střední hodnota rychlosti zpětného pohybu. Nástroj rotuje otáčkami n_n a obrobek rotuje otáčkami n_o . Výsledný evolventní profil zubů obráběného kola je vytvořen jako obálka evolventních boků zubů nástroje, vznikající



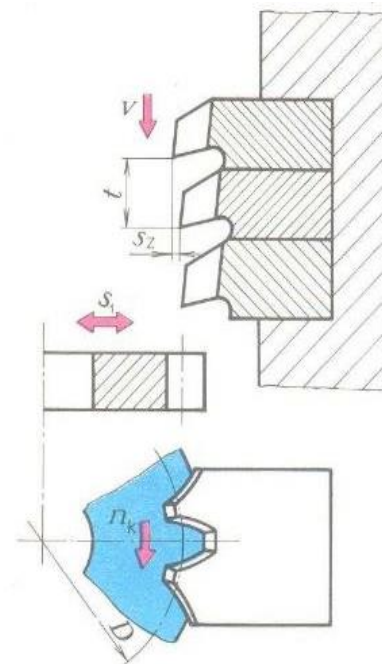
Obr. 14 Kinem. pohybů čel. obrázení Fellows [6]

kombinací translačních a rotačních pohybů. Obrázení kotoučovým nožem se v provozních podmínkách nazývá Fellows. Kinematika pohybů, viz obr. 14. Vhodné pro vnitřní ozubení.

- Protahování

Technologie protahování se používá jak pro výrobu vnějších ozubení, tak ozubení vnitřních. Nasazení této metody většinou připadá v úvahu tehdy, pokud je uvažována velkosériová a hromadná výroba. Nástrojem u protahování je protahovací trn. Ten může být vyroben celý z rychlořezné oceli, nebo je jeho těleso ze zušlechtnuté konstrukční oceli a jednotlivé protahovací segmenty z RO jsou upevněny na tomto tělese.

Vnější ozubení se vyrábí pomocí dělicího způsobu. Po protažení jedné zubové mezery se obrobek na dělicím přístroji pootočí o jednu zubovou rozteč a dojde k protažení další mezery. Takto se cyklus opakuje, dokud nedojde k protažení celého ozubení. Kromě plochých protahovacích trnů lze použít kruhové protahovací nástroje. Schéma vnějšího protahování je znázorněno, viz obr. 15.



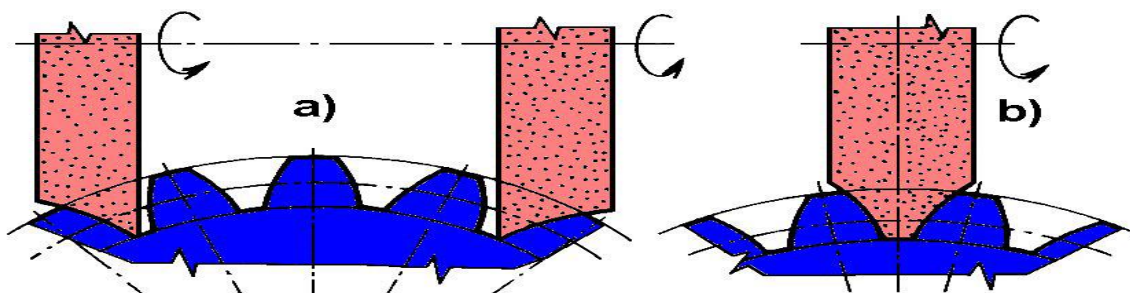
Obr. 15 Protahování vnějšího zubu [22]

Vnitřní ozubení se protahuje najednou protahovacím nástrojem, který má po celém obvodu břity tvaru zubových mezer. Takto se dají protahovat i jiné tvary než vnitřní ozubení. Jde například o drážku pro pero nebo drážkovaný hřídel či vnitřní šestihran. V kalibrované části všech protahovacích trnů je tvar výsledné zubové mezery. Jedná se o technologie vyznačující se vysokou přesností vyráběného ozubení. Platí přímá úměra, že čím přesněji je vyroben protahovací trn, tím přesnější je protažené ozubené kolo.

- Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči

Broušení obecně slouží především pro dokončovací operace. Broušením se odstraňují nepřesnosti po obrábění a také deformace po tepelném zpracování.

Broušení je možné provést brousicími kotouči s tvarem jednoho boku zubu, pomocí kterých se brousí odpovídající boky všech zubů kola (jeden kotouč brousí levé boky, druhý pravé boky), nebo kotoučem ve tvaru zubní mezery, který brousí oba boky naráz. Po zbroušení zubu nebo zubové mezery se obrobek v dělicím zařízení pootočí o jednu zubovou rozteč. Tento způsob broušení je vysoce produktivní, ale jeho nevýhody jsou nižší přesnost v závislosti na přesnosti dělicího přístroje a přesnosti profilu brousicího kotouče a vyšší provozní náklady. Pro každý modul, počet zubů a úhel záběru je třeba mít k dispozici odpovídající šablony a dělicí kotouče. Oba způsoby jsou znázorněny, viz obr. 16.



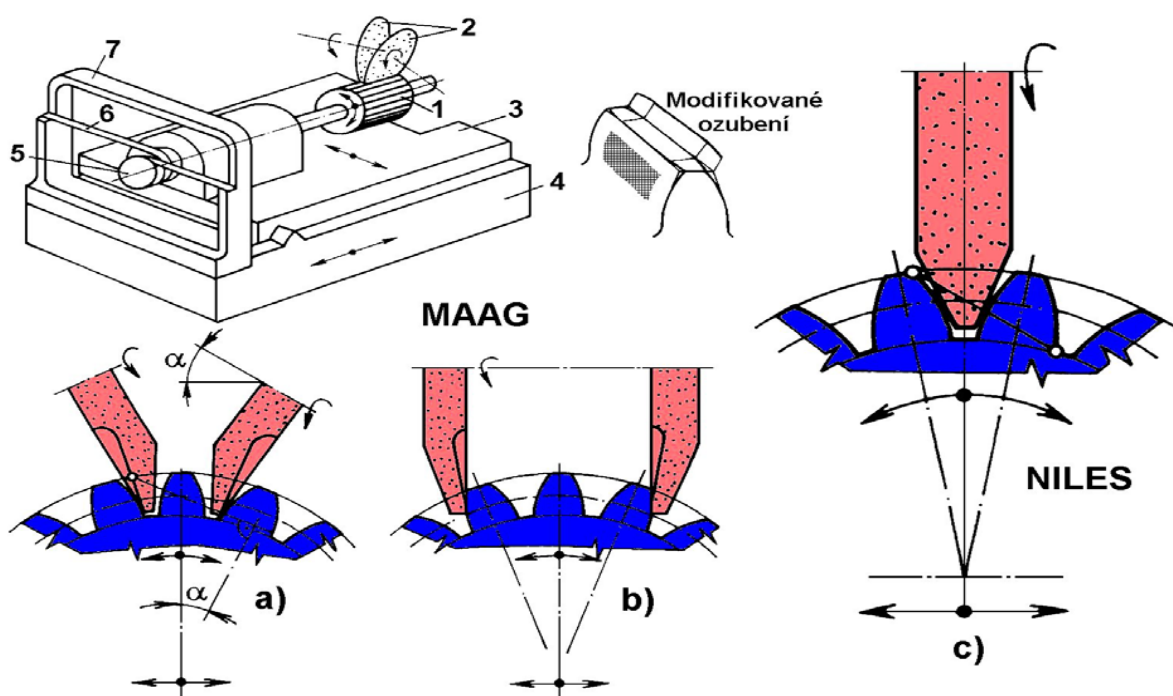
Obr. 16 Broušení čelních ozubených kol dělicím způsobem: a) dva kotouče s profilem ve tvaru boku zubu, b) jeden kotouč s profilem ve tvaru zubové mezery [6]

- Broušení dělicím způsobem s odvalem boku zubu

Tento typ broušení se dělí na dva systémy. Systém Maag, kde se broušený zub odvaluje po dvou brousicích kotoučích a systém Niles, kde se odvaluje po jednom brousicím kotouči.

Odvalovací pohyb u systému Maag je vytvářen superpozicí příčného a rotačního pohybu obrobku. Obrobek se otáčí vlivem odvinování ocelových pásů z kotouče, jehož poloměr je roven poloměru základní kružnice kola, které je broušeno, zmenšeného o tloušťku odvinuvších se pásů. Střídavý pohyb příčného suportu zajišťuje broušení mezery a postupné odvalování. Podélný suport koná zároveň pohyb ve směru osy kola, což zajišťuje broušení v celé délce zubu. Po obroušení jedné zubové mezery se obrobek pootočí o jednu zubovou rozteč a celý cyklus začíná nanovo. Takto se pokračuje až do obroušení celého ozubení.

Systém Niles se vyznačuje odvalováním boku zubu po jednom brousicím kotouči, který se shoduje s profilem zubu ozubeného hřebenu. Brousicí kotouč koná rotační pohyb a zároveň přímočarý vratný pohyb ve směru osy broušeného kola. Odvalovacího pohybu v obou smyslech je dosaženo otáčením broušeného kola kolem jeho osy, při souběžném posuvu ve směru osy brousicího kotouče. Broušení probíhá od paty k hlavě zubu bok po boku. Dělicí pohyb vykonává broušené ozubené kolo. Odvalování metodou Maag a Niles je znázorněno, viz obr 17.

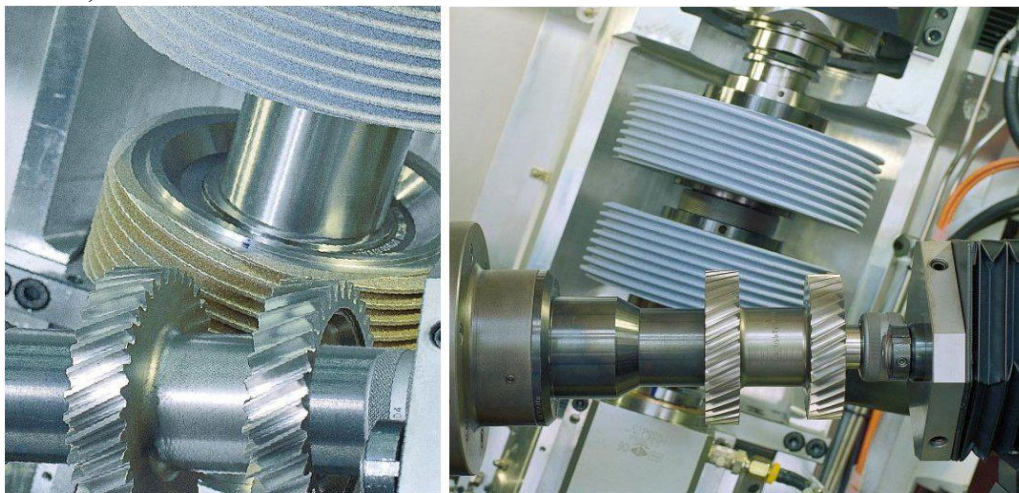


Obr. 17 Broušení čelního ozubení s odvalem boku zubu

- a) broušení Maag pomocí kotoučů skloněných pod úhlem záběru,
b) broušení Maag kolmo postavenými kotouči, c) broušení Niles, 1- obrobek, 2- brousicí kotouče, 3- příčný suport, 4- podélný suport, 5- odvalovací kotouč, 6- ocelový pás, 7- stojan odvalovacího zařízení [6]

- Broušení odvalovacím způsobem

Tato technologie je velice podobná odvalovacímu frézování. Rozdíl tvoří jednoduchý nebo dvouchodý brousicí šnek, který nahrazuje odvalovací frézu. Šnek vytváří nekonečným počtem obálkových profilů svého závitu profil ozubení. Tento způsob broušení je oproti předchozím dvěma nejefektivnější. Použití je vhodné zejména pro malé moduly. U kol s modulem menším než 3 mm je možné brousit do materiálu zcela. Nutností této technologie je zcela synchronní běh nástroje a obrobku. Přesnost se odvíjí od tvarování brousicího kotouče z hlediska jeho profilu a stoupání. Průměr brousicího kotouče bývá od 350 do 400 mm. Důležitým faktorem je i správnost dynamického a statického vyvážení. Brousicí nástroj v záběru s obrobkem je znázorněn, viz obr. 18.



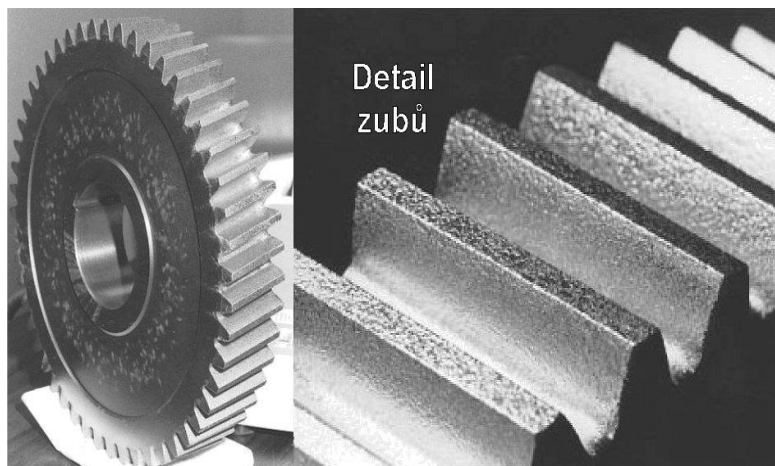
Obr. 18 Broušení odvalovacím způsobem [6]

- Ševingování a honování

Ševingování je dokončovací operace pro nekalená ozubená kola. Princip je založen na odebrání jemné třísky z boků zubů, čímž se zlepšuje profil zubů, snižuje drsnost povrchu a zpřesňují se úchytky v zubových roztečích. Nástroj tvoří přesné modifikované ozubené kolo se šikmými zuby. Záběr ševingovacího kola s obráběným kolem je vlastně záběr šroubového válcového soukolí, které je určeno kinematickými závislostmi šroubového pohybu. Jedno z kol vykonává ještě vratný posuvový pohyb, u menších kol je to obráběné kolo, u větších ševingovací. Lze s výhodou používat moduly do 8 mm.

Na stejném principu je založeno honování, kterému se někdy říká brousicí ševingování. Je určeno výhradně pro kalená ozubená kola. Zlepšuje tvar zubů, snižuje drsnost funkčních povrchů nebo odstraňuje úchytky vzniklé tepelným zpracováním.

Stroje pro ševingování i honování mohou být stejné, v některých výjimkách se u honování



Obr. 19 Nástroj pro honování s diamantovým brusivem [6]

používají speciální honovací stroje. Honovací kolo může být vyrobené ze směsi plastu a brusiva nebo z oceli. Zuby jsou pokryty tenkou vrstvou diamantového brusiva, které je na ně vázané pryskyřičným nebo kovovým pojivem. Nástroj pro honování je znázorněn, viz obr. 19.

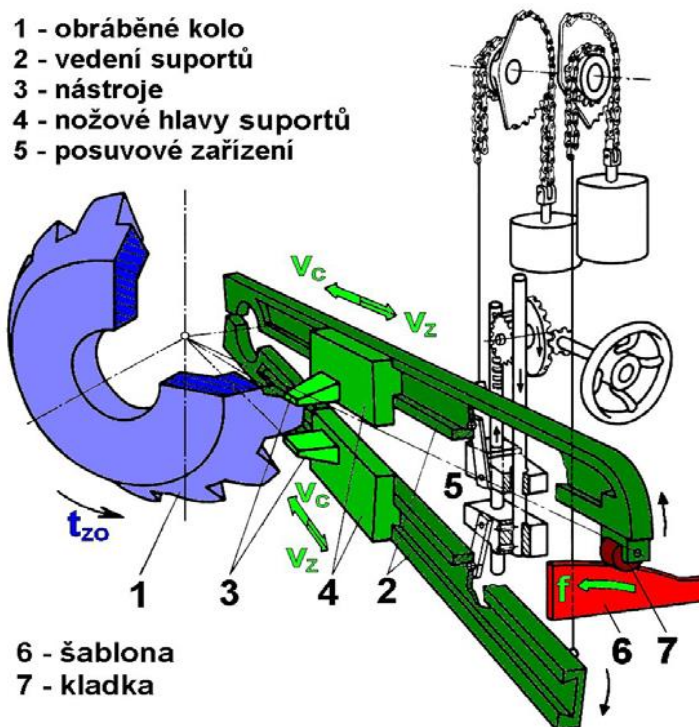
- Obrábění kuželových kol

U kuželových kol s přímými a šikmými zuby se dají použít technologie frézování kotoučovou frézou, čepovou frézou, dvěma nožovými hlavami, technologie obrázení podle šablony nebo dvěma noži nebo protahováním.

Frézování tvarovou frézou probíhá na univerzálních frézkách dělicím způsobem (princip dělicího způsobu viz výše v této kapitole). Tvarovou frézou nelze vyrobít dokonale správné ozubení, protože nástroj nemůže lineárně zmenšovat modul ozubení směrem k vrcholu kužele obráběného kola. Mezi tvarové frézy se řadí například kotoučová, stopková nebo čepová. Kotoučovou frézou lze obrábět kola s přímými a šikmými zuby, čepová fréza může být použita pro výrobu ozubení se šípovými a zakřivenými zuby. Čepové frézy slouží k obrábění kol větších modulů až do hodnoty 50 mm.

Frézování nožovými hlavami se využívá pro výrobu kol menších a středních rozměrů s modulem 0,3 až 10 mm. Nástrojem jsou dvě nožové kotoučové hlavy. Principem je odvalování vyráběného ozubení po plochém základním kole, jehož zuby jsou tvořeny břity kotoučových hlav. Zubová mezera se vytváří zapichováním a odvalováním bez podélného posuvového pohybu hlav. Ozubení je frézováno dělicím způsobem.

Obrázení podle šablony se používá při výrobě přesných kol s většími moduly. U stejného počtu zubů kol s různými moduly stačí k vyrobení jedna šablona. Je zapotřebí dělicí přístroj. Obráběné kolo se upne na hřídel dělicího přístroje. Obrázeční nože upevněné v hlavách suportů se přímočarým vratným pohybem pohybují po vedení suportů. Polohu nástroje určuje kopírovací kladka umístěná u konce vedení suportu, která se pohybuje po šabloně. Výhody této metody spočívají ve výrobě přesného kuželového ozubení, kde se modul zmenšuje směrem k vrcholu kužele vyráběného kola. Nevýhodou je nízká jakost povrchu z důvodu obrábění pouze špičkami nástrojů a nízká produktivita. Schéma obrázení podle šablony je znázorněno, viz obr. 20.



Obr. 20 Kinematické schéma obrázení ozubení kuželového kola podle šablony [6]

Obrázení dvěma noži funguje na principu odvalu boku zubu. Lichoběžníkové nože upnuté v otočné hlavě konají řezný pohyb v_c ve směru povrchových přímek boků zubů. Jejich ostří představují zubovou mezery plochého základního kola, se kterým zabírá obráběné kolo. Boky zubů ve tvaru evolventy jsou vytvářeny jako obálka poloh břitů nástrojů při záběru. Metoda slouží k hrubování nebo dokončování kol do modulu 20 mm a průměru 1200 mm.

Protahování se uplatňuje v hromadné a velkosériové výrobě především v automobilovém průmyslu. Nástroj tvoří vodorovně upnutý kotoučový protahovák s průměrem 450 až 600 mm, který má po obvodu mechanicky upevněny segmenty s jednotlivými břity ve tvaru zubové mezery. Profily břitů jsou tvořeny kruhovými oblouky, které nahrazují evolventní zakřivení boku zubu. Velikost profilů se po obvodu nástroje postupně zvětšuje. Nástroj vykonává rotační pohyb a je posunován podél zubu od menšího profilu k většímu. Když prochází částí

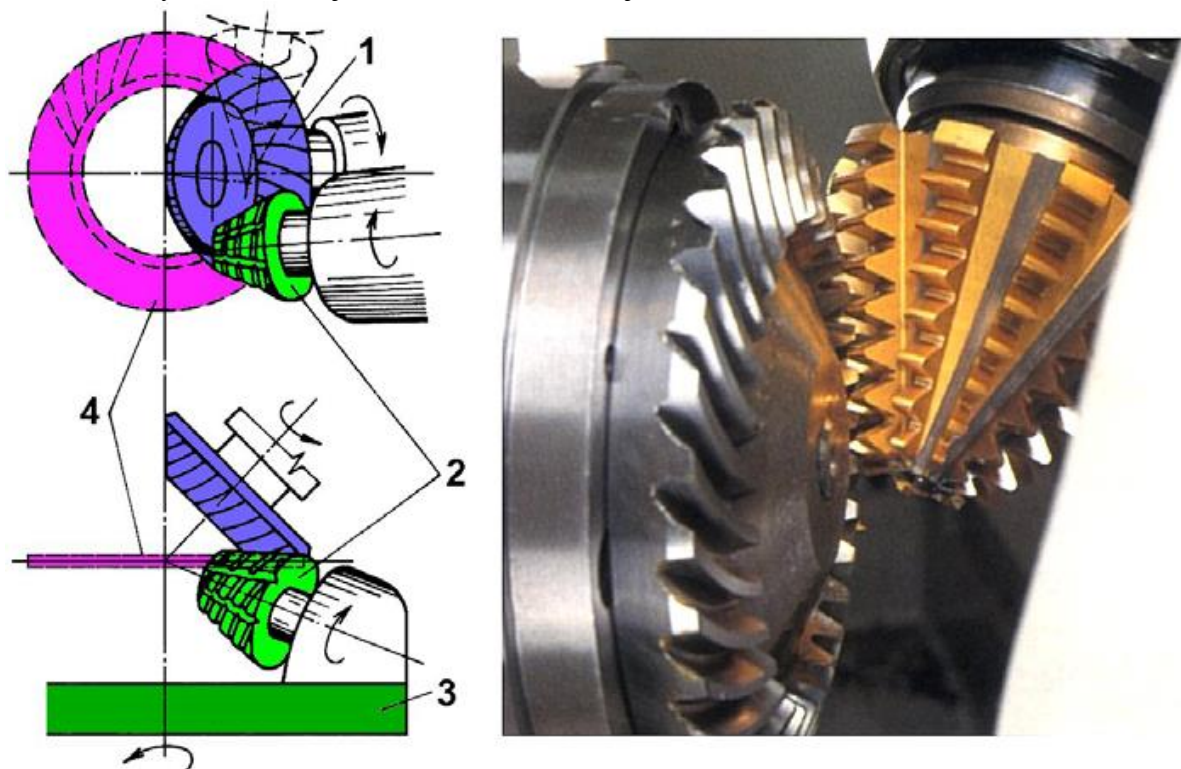
s vynechanými břity je obrobek pootočen v dělicím přístroji na další zubovou mezeru. Jedná se o velmi produktivní způsob výroby. Pro obrobení jedné zubové mezery stačí řádově sekundy. Nástroj je i jako u ostatních protahovacích nástrojů poměrně drahý.

Pro kuželová kola se zakřivenými zuby lze použít tři způsoby odvalovacího frézování. První je způsob Gleason pro kruhově zakřivené zuby, druhý se nazývá Oerlikon, který je určen pro zuby zakřivené podle prodloužené epicykloidy a třetí způsob Klingelnberg se používá pro zakřivené zuby podle epicykloidy nebo podle prodloužené evolventy.

Gleason je způsobem, charakterizovaným jako odvalovací frézování dělicím způsobem za pomoci čelní nožové hlavy. Princip vyplývá z dvoubokého záběru plochého základního kola s obráběným kolem. Základní kolo tvoří unášecí deska, na kterou je upnuta frézovací hlava. Nože hlavy mají lichoběžníkový profil, jsou uspořádány za sebou se střídajícími vnějšími a vnitřními břity.

Oerlikon představuje odvalovací frézování čelní nožovou hlavou, která vytváří boky zubů plynulým odvalováním. Nejsou zde zapotřebí dělicí pohyby, jako u předchozí metody Gleason. Ozubení vzniká kombinací tří na sobě závislých pohybů. Rotačního pohybu nožové hlavy, rotačního pohybu obrobku, který je současně dělicím pohybem, a natáčením unášecí desky, na kterou je upnuta čelní nožová hlava. Břity na čelní nožové hlavě jsou uspořádány po skupinách tak, že vytváří části samostatných spirál.

Klingelnberg využívá pro výrobu kuželovou frézu, která vytváří boky zubů kola plynulým odvalováním. Se způsobem Oerlikon má tento způsob společnou výrobu zubové mezery. Obdobně je zde mezera vytvářena kombinací tří pohybů. Jsou to rotační pohyb frézy, rotační pohyb obrobku a odvalovací pohyb frézy na unášecí desce. Klingelnberg se využívá při kusové a malosériové výrobě. Nástroj v záběru s obrobkem je znázorněn, viz obr. 21.



Obr. 21 Frézování kuželového kola s paloidním ozubením metodou Klingelnberg
1- obráběné kolo, 2- kuželová odval. fréza, 3- unášecí deska, 4- pomyslné základní kolo [6]

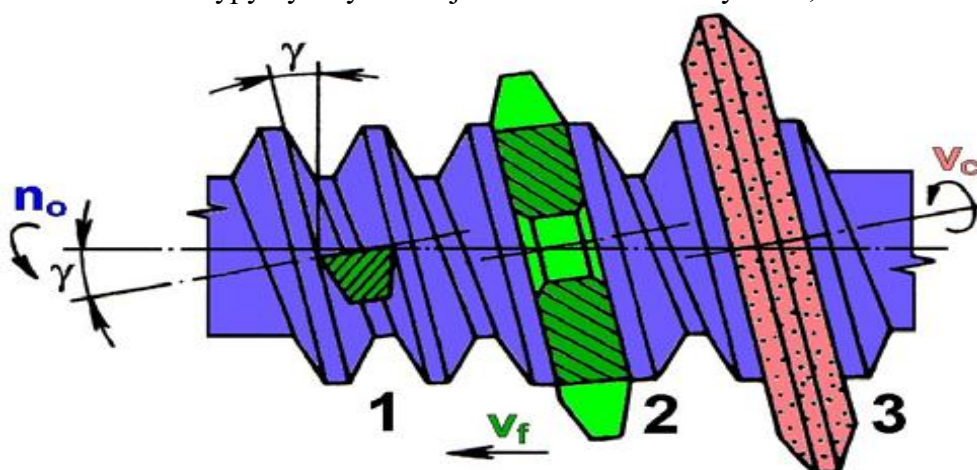
- Obrábění šneků a šnekových kol

Šneky válcových tvarů jsou vyráběny soustružením a frézováním. Pro dokončování povrchu se využívá broušení.

Při soustružení je použit tvarový nůž. Soustružení se používá především pro malé počty vyráběných kusů, pro šneky malých modulů a probíhá na univerzálních soustruzích. Na velké moduly je použito jen při větších úhlech stoupání γ .

Frézováním se vyrábí šneky na univerzálních nebo odvalovacích frézkách, přičemž nástroje bývají kotoučové nebo čepové přímoboké nebo tvarové frézy.

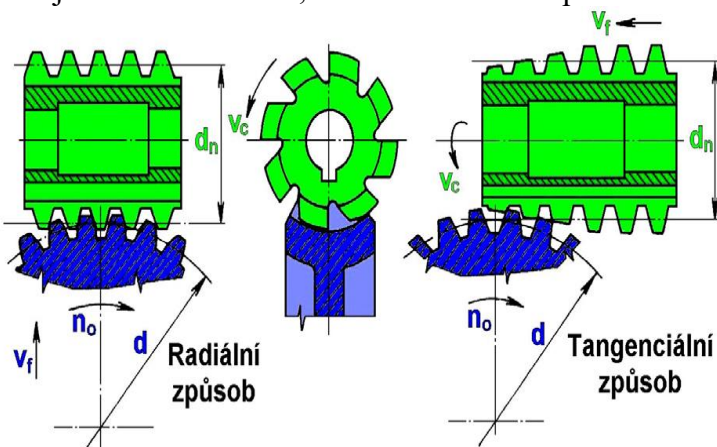
Globoidní šneky se obrábí tvarovými noži upnutými v nožové hlavě nebo jsou frézované čepovou frézou. Tři různé typy výroby šneků je možné schematicky vidět, viz obr. 22.



Obr. 22 Schéma výroby válcového šneku: 1- soustružení tvarovým nožem, 2- frézování kotoučovou frézou, 3- broušení tvarovým kotoučem [6]

Šneková kola jsou vyráběna frézováním na odvalovacích nebo univerzálních frézkách. U odvalovacího způsobu je nástrojem odvalovací fréza, která má tvar a rozměry stejné se spolu zabírajícím šnekem. U odvalování existují tři způsoby výroby. Radiální, u kterého se obráběné kolo posouvá proti nástroji, tangenciální, kde se odvalovací fréza posouvá ve směru tečném k roztečné kružnici kola, a radiálně tangenciální, kde se radiálním posuvem hrubuje a tangenciálním dokončuje. Odvalovací frézování je schematicky znázorněno, viz obr. 23. Praktické použití je znázorněno, viz obr. 24.

Na univerzálních frézkách se kolo frézuje nejprve tvarovou kotoučovou frézou a potom dokončuje šnekovou frézou, která rozměrově odpovídá rozměrům šneku vyráběného soukolí.



Obr. 23 Odvalovací frézování šnekových kol [6]



Obr.24 Nástroj a obrobek [6]

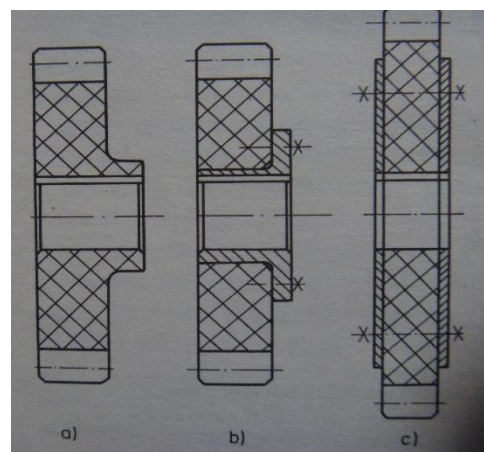
2.2 Technologie výroby plastových ozubených kol [26, 8]

Plastová ozubená kola slouží k přenosu menších sil při nižších obvodových rychlostech. Jejich předností je dobré tlumení vibrací a rázů, tichý chod a korozní odolnost. Důvodem nahrazování kovových ozubených kol bývá snížení hlučnosti, snížení hmotnosti, úspora materiálu, rychlejší výroba a cena. Možné technologie výroby jsou odlévání, obrábění, vytlačování, vyfukování, lisování, spékání, vystřihování, 3D-tisk a především pak vstřikování, které je k výrobě plastových ozubených kol využíváno nejvíce. Vzhledem k omezenému rozsahu této práce bude pozornost věnována pouze obrábění, 3D tisku a vstřikování.

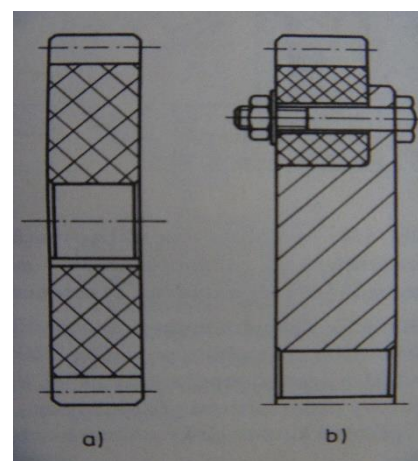
2.2.1 Technologie obrábění plastových kol [8]

Obrábění kol se zhotovuje z bloků, tyčí, kotoučů a desek. Kvůli uspořené pracnosti mají kola většinou tvar plných celistvých kotoučů. Profilování kol není příliš časté, neboť např. u textitu by se při obrábění porušila vrstva výztužné tkaniny. Šířka kola je obvykle pěti- až desetinásobek modulu m . Lze použít i širší ozubení. To se například použije u materiálů s nižší tuhostí, aby se při působení radiálního tlaku nebortila. Výroba se uskutečňuje odvalovacím frézováním nebo odvalovacím obrážením, přičemž obrázení dává přesnější, symetrické profily zubů. Obě metody jsou popsány výše, viz kapitola 2.1.5. Upevnění kol na hřídel se provádí za pomoci jednoho nebo dvou per, viz obr 26a. Drážky pro pero by měly mít zaoblené vnitřní hrany z důvodu omezení vrubového účinku. V místech, kde by tlak pera překročil 5 MPa u nevyztužených plastů nebo 10 MPa u vyztužených plastů, se prodlouží náboj na jednu nebo obě strany, viz obr 25a. Případně se dá použít kovový přírubový náboj, viz obr 25b, který se s plastovým kolem sešroubuje. Dražší provedení umožňuje připevnit kolo na drážkový hřídel.

Při konstrukci rozměrných ozubených kol se z plastu vyrobí pouze plastový ozubený věnec, který se pak přišroubuje ke kovovému kotouči, viz obr 26b. Toto konstrukční uspořádání zvyšuje tuhost kola a zmenšuje rozměrové změny způsobené teplotní roztažností a navlhavostí. Doporučuje se použít spojení šrouby a pružnými podložkami. Ozubená kola z PUR mívají kovovou vložku, která slouží ke zvýšení pevnosti a tuhosti. U ozubených kol z textitu se jako polotovary používá desek, u kterých jsou vrstvy tkaniny vzájemně pootočené, aby se omezil vliv anizotropie tkaniny. Modul u kol z textitu by neměl být menší než 1, zejména pokud se jedná o hrubší tkaninu. Nesmí se obrábět kola z navíjených trubek a tyčí, protože by se zuby v rovinách textilové výztuže snadno ulamovaly. Obrábění ozubených kol se používá u materiálů, které nelze vstřikovat či lisovat. Jedná se například o vysokomolekulární materiál PE. Obráběcí technologie se používá u kusové výroby a rozměrných ozubených kol. Nesmí se obrábět příliš velkým výkonem, protože se obrobek může zahřát a změnit tvar.



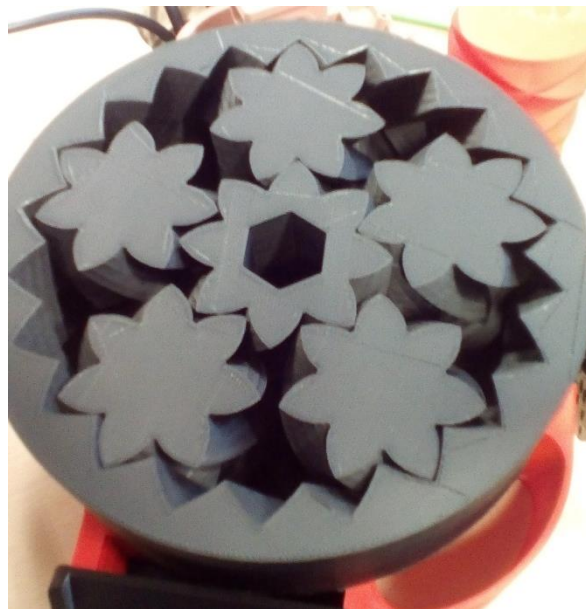
Obr. 25 Úpravy pro snížení tlaku pera v drážce a) prodloužený náboj b) vsazený přišroubovaný kov. Náboj c) příložné kov. desky stažené šrouby



Obr. 26 Obráběná kola, a) celoplastová, b) přišroubovaný věnec ke kovovému kotouči [8]

2.2.2 Technologie rapid prototyping (3D-tisk) [18, 27]

Technologie 3D tisku již byla zmíněna, viz kapitola 2.1.3. Nejnižší pořizovací cena tiskáren, které dokážou zpracovávat plastový materiál (např. ABS plast), se v dnešní době pohybuje okolo 10 000 Kč. Pokud je vyžadován větší modelovací prostor, kvalita zpracování, rychlost tisku a další aspekty, pak si zákazník musí připlatit, protože ceny dražších tiskáren přesahují i 100 000 Kč. Ještě dražším strojem je tiskárna, která dokáže zpracovat kovový materiál. Pořizovací cena je v tomto případě vyšší než 1 000 000 Kč. Příkladný kovový výrobek, který by podle autora měl splňovat i dostatečné mechanické vlastnosti, je znázorněn, viz obr. 9. Příklad plastového prototypu, v tomto případě soukolí planetové převodovky vytisknuté v centru FabLab, lze vidět, viz obr. 27. Technologie 3D tisku umožňuje vyrábět vnější i vnitřní tvary libovolné složitosti. Jeho výhodou je například ověření smontovatelnosti a vyrobitelnosti. Existuje více druhů technologií, jejichž výčet a volbu materiálu si je možné prohlédnout, viz obr. 28. Tato technologie by do budoucna mohla znamenat průlom v kusové a malosériové výrobě, protože cena tiskáren bude pravděpodobně klesat a výrobní časy a kvalita výrobku se zlepšit.



Obr. 27 Planetová převodovka vyrobená technologií 3D tisku (vnější průměr 150 mm)

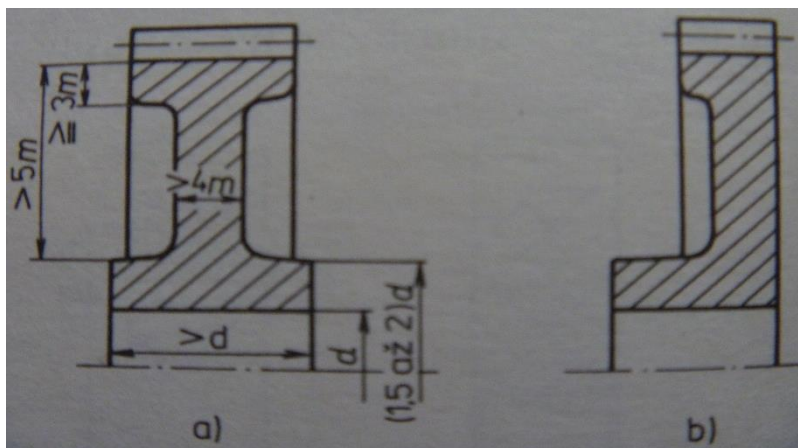
	Orientační velikost komory šxdxv [mm]	Materiál modelu	Tloušťka vrstvy [mm]	Přednosti	Nevýhody
S L A	600x600x500	Fotopolymer	0,05 – 0,15	Model může obsahovat přesné detaily a tenké stěny.	Výkonný laserový zdroj, fotopolymer vykazuje toxické vlastnosti, dokončovací vytvrzování modelu, malá tepelná odolnost modelu.
S G C	500x350x500	Fotopolymer, nylon	0,10 – 0,50	Poškozené vrstvy jsou odřezovány, model se staví bez podpor.	Výkonný laserový zdroj, malý výběr materiálu pro model.
S L S	350x350x450	Polyamid, polykarbonát, nylon, vosk, kovové prášky	0,10 – 0,50	Výkonný laserový zdroj, nenatavený prášek slouží jako podpora, široké spektrum materiálů.	Prostorově a energeticky náročné zařízení, nebezpečí rozptýlení kovového prášku, pórovitost modelu – nutnost dokončovacích operací, drsný povrch podpor.
D M L S	250x250x215 (EOSINT M270)	Kovové prášky	0,02 – 0,04	Výkonný laserový zdroj, nepotřebovaný prášek je z 98% znovu využíván, široké spektrum materiálů.	Prostorově a energeticky náročné zařízení, nebezpečí rozptýlení kovového prášku, pórovitost modelu – nutnost dokončovacích operací, drsný povrch podpor.
L O M	500x700x300	Papír s jednostranným pojivem	0,01 – 0,20	Model má podobnou strukturu jako dřevo, lze ho snadno obrábět – tvarová stálost.	Výkonný laser, produkce nežádoucích výparů, nižší přesnost součástí, pracné odstraňování podpor.
F D M	200x200x300 (Dimension) 600x500x600 (Quantum)	ABS a ABS+, vosk, polykarbonát	0,05 – 0,33	Několik druhů materiálů, nepřítomnost škodlivých emisí.	Model nemá stejné mechanické vlastnosti v různých směrech, dokončovací operace – odstranění podpor.
M J M	300x180x200 (Invision) 250x190x200 (Thermojet)	Termopolymer, akrylátový fotopolymer	0,05 – 0,20	Velmi tenké vrstvy materiálu, nepřítomnost škodlivých emisí.	Model nemá stejné mechanické vlastnosti v různých směrech, dokončovací operace – odstranění podpor.

Obr. 28 Souhrn základních vlastností jednotlivých metod Rapid prototyping [27]

2.2.3 Technologie vstřikování [8, 29, 36]

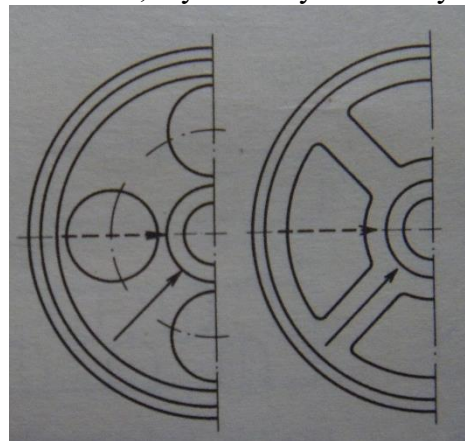
Technologie je vhodná pro větší výrobní série. Jedná se o nejpoužívanější technologii výroby plastových ozubených kol a plastových výrobků všech druhů vůbec. Tvar vyráběného kola může být téměř libovolný, záleží na tvaru vstřikovací formy, do které se vstřikuje zplastifikovaný materiál. U jednoduchých forem, kdy je ocelový model vtlačen do roztavené zinkové slitiny, se vyplatí vstřikovat i menší výrobní série o několika stech kusech. Vstřikují se jak plněné, tak i neplněné termoplasty. Běžně lze vstřikovat kola do průměru 150 mm, za zvláštních okolností i více.

Technologičnost výroby je dána tvarem ozubeného kola. Při vstřikování je nutno dbát na určité zásady, které jsou pro výrobu přesného výstřiku zapotřebí. Jednou z vhodných úprav je odlehčený tvar kola, (viz obr. 29), který zachovává dobrou tuhost i při ztenčené stěně. Jsou zde znázorněny doporučené rozměry náboje, stojiny a věnce. Tloušťka



Obr. 29 Vylehčený tvar vstřikovaného kola (m-modul ozubení), a) souměrné kolo, b) nesouměrné kolo [8]

a výška stojiny reguluje smrštění kola. Je proto dobré udělat před velkosériovou výrobou simulace a ověřovací sérii. Ztenčení stěny přináší úsporu materiálu, zrychlení výrobního cyklu a zmenšení smrštění kola při vstřikování. Šířka ozubení je doporučená okolo desetinásobku modulu m. Pokud je kolo nesymetrické, měla by být šířka kola okolo pěti- až sedminásobku modulu m. Při tloušťce stěny nad 10 mm mohou vznikat dutiny či povrchové propadliny. Tenčí stojina snižuje smrštění, pokud je však příliš tenká, mohou vznikat dutiny a propadliny v masivnějším věnci. Pokud je to možné, je dobré použít středový vtok materiálu, který umožní přesný kruhový tvar kola. Lze použít i odlehčovací otvory nebo ramena ve stojině, ale má to za následek nerovnoměrné smrštění, které předurčuje kola k méně namáhaným ručním převodům. Odlehčené stojiny jsou znázorněny, viz obr. 30.



Obr. 30 Dva typy odlehčené stojiny, směr malého smrštění- přerušená šipka, směr velkého smrštění- plná šipka [8]

Dalším faktorem technologičnosti je upevnění plastového kola na hřídeli. Mělo by být jednoduché. [8]

Kolo lze upevnit jedním či dvěma pery, u menších kol s nižšími zatíženími lze pero vystříknout i s kolem za předpokladu, že drážka bude skrz na skrz a hrany zaoblené. Malá ozubená kola lze nastříknout na ocelový hřídel povrchově upravený tak, aby došlo k přilnutí termoplastu (prolis, vroubky, výstupky).

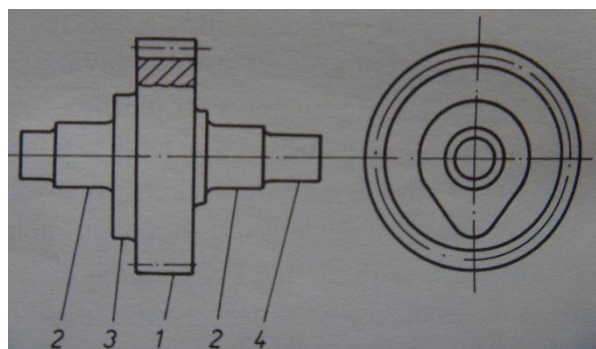
Kola, na která je kladena vysoká rozměrová stabilita a přesnost záběru nebo je u nich třeba větší tuhost, jsou řešena jako kombinovaná. Materiál náboje a disku je z jiného materiálu než z plastu, a to například z oceli, litiny nebo hliníku. Teprve na ně je nastříknut ozubený věnec z plastu. Věnec je upevněn tvarovými drážkami, které mají za úkol zabránit pootočení věnce oproti disku a náboji, stejně jako zabránit uvolnění věnce při vyšším teplotním namáhání.

Dále je třeba zajistit správné otočné uložení na hřídeli. Při nízkých otáčkách slouží střed kola jako kluzné ložisko, viz obr. 31 bod 2, při vysokých otáčkách se do otvoru v náboji lisuje kuličkové ložisko.

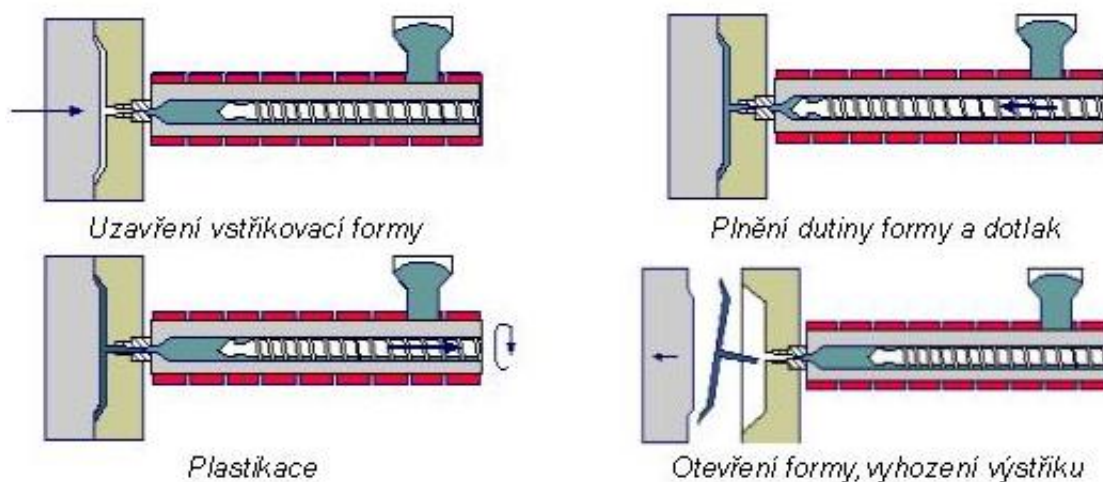
- Princip a postup vstřikování

Vstřikování je jedním ze způsobů tváření plastů, kde je dávka zpracovávaného materiálu vstříknuta z pomocné tlakové komory do uzavřené dutiny kovové formy, kde vzniká po ztuhnutí konečný výrobek. Plast v podobě granulátu je z násypky

odebírán pracovní částí vstřikovacího stroje v podobě šneku nebo pístu, který granulát dopravuje do tavicí komory, kde je za pomoci tření a přídavného tepla granulát plastifikován a vzniká tavenina. Tavenina je poté vstříknuta do výše zmíněné dutiny formy, kterou zaplní a zaujme její tvar. Forma je na začátku cyklu otevřená, poté se uzavře dostatečnou silou, aby se při vstřikování neotevřela. Okamžikem vstupu taveniny do formy se tavenina začíná ochlazovat, což způsobuje smrštění. Poté přichází na řadu tlaková fáze, kdy je za pomoci dotlaku sníženo smrštění a rozměrové změny. Dotlak může být stejně vysoký jako vstřikovací tlak nebo může být nižší. Aby se dalo dotlačovat, musí být před šnekem dostatek materiálu tzv. polštáře. Objem materiálu musí být optimální a nesmí být příliš velký (ideálně okolo 10 až 15 % a méně než $1 \cdot D$ (průměr šneku)), aby nedošlo k tepelné degradaci hmoty. Po dotlaku nastává znovu plastifikace granulátu. Poté co tavenina ztuhne, je forma otevřena, výstřik vyhozen, vzniká výrobek (výrobky) a cyklus začíná nanovo. Cyklus se dá rozdělit do kroků, viz obr. 32.



Obr. 31 Vstříknuté kolečko a hřídel
1- ozubení, 2- kluzné ložiskové plochy, 3- vačka, 4- hřídel [8]



Obr. 32 Vstřikovací cyklus [29]

- Časy vstřikovacího cyklu

Strojní doby jsou časy, které určují trvání otevření a uzavření formy. Moderní stroje využívají velké rychlosti otevření a zavření s tím, že bezprostředně před dotykem zpomalí, aby nedošlo k poškození formy. Strojní doby se pohybují v řádu několika sekund.

Doba vstřikování je doba plnění dutiny formy je určena posuvnou rychlostí šneku vpřed v axiálním směru. Doba plnění bývá od zlomku sekundy po několik sekund, pokud se jedná o hmotnější výstřiky. Měla by být co nejkratší, protože tavenina chladne a mohla by ztratit tekutost, což by vedlo k nezaplnění dutiny a nedostříknutému zmetku. Vliv na kvalitu má teplota formy, řešení vtokové soustavy, tvar výstřiku i vstřikovaný materiál.

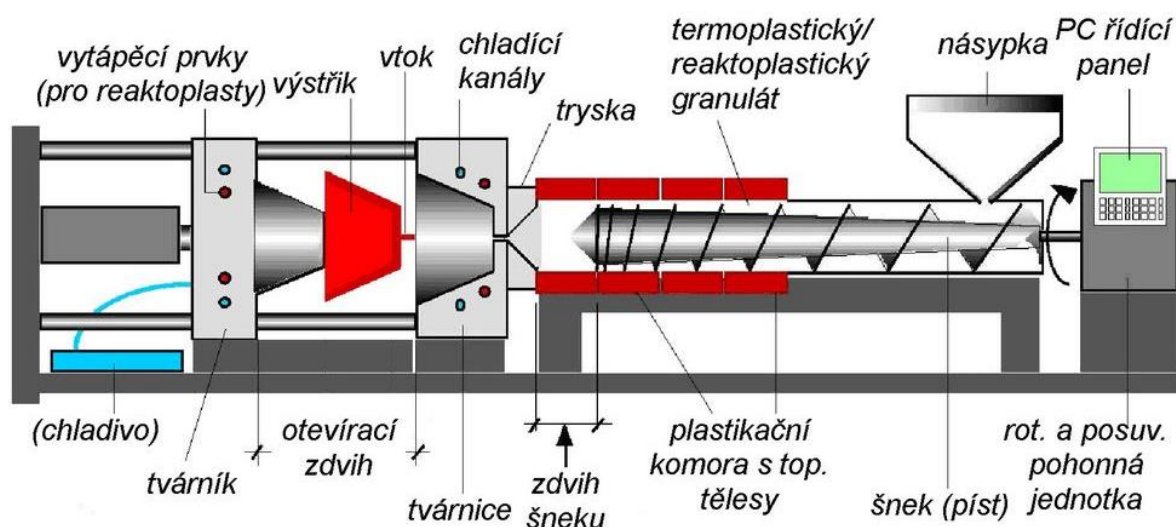
Doba dotlaku nastává potom co se naplní dutina a dojde ke stlačování, kdy rychlost prudce klesá a tlak stoupne. V této chvíli je nutné přepnout na dotlak, který by měl být nižší než vstřikovací tlak, aby nedošlo k poškození formy. Doba závisí na průřezu vtokového kanálu a pohybuje se okolo jednotek až desítek sekund. Cílem dotlaku je kompenzace smrštění.

Doba plastifikace je čas potřebný k homogenizaci granulátu. Teplo, které je třeba k roztavení jedné dávky, je z jedné třetiny z el. topení a ze dvou třetin z tření hmoty při hnětení.

Doba chlazení je časově nejdelší část cyklu a pohybuje se od několika sekund do několika minut. Závisí na tloušťce stěny, teplotě taveniny, formy a druhu plastu. Chladnutí ovlivňuje mimo jiné především kvalitu povrchu a strukturu výstřiku.

- Vstřikovací stroj

Skládá se ze vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky a řízení s regulací.



Obr. 33 Schéma vstřikovacího stroje [29]

Vstřikovací jednotka slouží k přeměnění granulátu na taveninu o určité viskozitě a k vstřikování taveniny do formy. Vstřikovací jednotka se skládá z tavicí komory, šneku, trysky a topení a dalších komponent. Konce šneků musí být konstruované tak, aby při vstřikování nedocházelo ke zpětnému tečení taveniny zpět směrem k násypce. Nejspolehlivější zakončení je pomocí zpětného uzávěru. Teplota v tavicí komoře je rozdělena do několika zón. Nejnížší teplota se nastavuje v oblasti u násypky, nejvyšší teplota u trysky. Teplota u násypky nesmí být příliš velká, aby nedošlo k předčasnému spečení granulátu. Z toho důvodu se chladí část tavicí komory, která je v dotyku s násypkou. Tryska má za funkci spojovat komoru a formu. Přes ni probíhá vstřikování do vtokových kanálků ve formě. Schéma, viz obr. 33.

Uzavírací jednotka slouží k otevírání a zavírání formy a zajišťuje, aby se forma při vstřiknutí tlakem taveniny nepootočila. K tomu slouží prisouvací a uzavírací síla. Skládá se z opěrné desky pevně spojené s ložem stroje, pohyblivé desky, připevněné k pohyblivé části formy (tvárníku), upínací desky s otvorem pro trysku stroje, ke které se připevní nepohyblivá část formy (tvárnice), vedení pro pohyblivou desku z přidržovacího a uzavíracího mechanismu. Většinou jsou vůči sobě vstřikovací a uzavírací jednotka v horizontální poloze.

- Vstřikovací forma

Formy jsou zhotoveny z kovu, nejčastěji oceli, u menších sérií i ze zinkové slitiny. Vyrábí se technologií vyjiskřování, za pomoci měděné elektrody. Musí odolávat vysokým tlakům, být dostatečně přesné, umožnit snadné vyjmutí, být finančně přijatelné a pracovat automaticky. Konstrukce a výroba jsou složité a vyžadují odborné znalosti. Důležitým faktorem je stanovení rozměrů a výrobních tolerancí. Plast se totiž smršťuje více tam, kde je tlustší stěna, například

u paty zubu při výrobě ozubených kol. U nich je zapotřebí vyrobít formu s větším úhlem záběru, než bude mít vystříknuté ozubené kolo. Úhel záběru α , korigovaný modul dutiny formy m a korigovaný průměr základní kružnice D se vypočte dle vztahů (2.1), (2.2) a (2.3).

$$\cos \alpha = (1 + s) \cdot \cos \alpha' \quad (2.1)$$

$$m_1 = m' \cdot (1 + s) \quad (2.2)$$

$$D_1 = z \cdot m \quad (2.3)$$

kde: α' - úhel záběru dutiny formy [°]

α - úhel záběru výstřiku [°]

m_1 - korigovaný modul dutiny formy [mm]

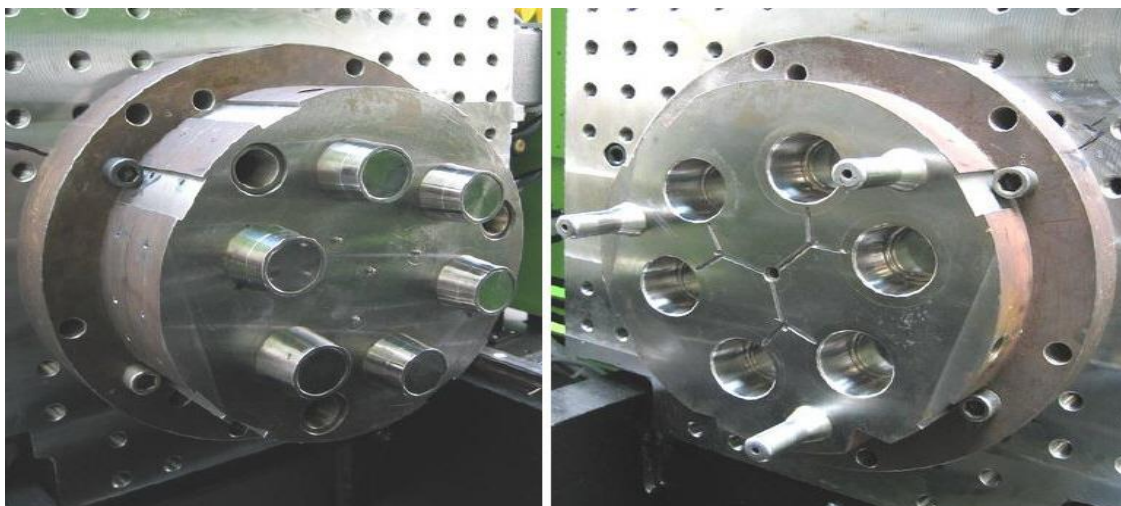
m' - modul výstřiku ozubeného kola [mm]

D_1 - korigovaný průměr základní kružnice [mm]

z - počet zubů [-]

s - smrštění [%·100⁻¹]

Vstřikovací formy lze rozdělit do skupin: podle násobnosti, podle způsobu zaformování a konstrukčního řešení (dvoudeskové, třideskové, etážové apod.) a podle konstrukce formy (forma se vstřikem kolmo na dělicí rovinu nebo do dělicí roviny). Kvalita a jakost výstřiku je především ovlivněna vtokovým systémem (ústí vtoku a systém kanálků rozvádějících taveninu po formě). U vícenásobné formy je velmi důležité, aby byly všechny tvarové dutiny plněny současně a rovnoměrně se stejnou teplotou taveniny a stejným tlakem. Uspořádání tvarových dutin může být například do hvězdy nebo v řadě. Aby tavenina chladla co nejrychleji, zavádí se do vstřikovací formy temperační systém. Ten se skládá ze systémů kanálků a dutin, které umožňují přestup tepla z taveniny do formy a kapaliny. Případné nerovnoměrné ochlazování způsobuje nežádoucí vnitřní pnutí nebo vznik trhlin. Průřez kanálů se obvykle pohybuje od 6 do 20 mm a jejich otvor bývá kruhový. Celková délka kanálů má být konstruována tak, aby rozdíl teplot temperační kapaliny na vstupu a výstupu byl do 3 až 5 °C. Součástí stroje je vyhazovací systém. Ten je většinou mechanický. Různé druhy provedení představují například vyhazovací kolíky, stírací kroužky nebo stírací desky. Také je třeba zajistit odvzdušnění tvarové dutiny. To je zapotřebí kvůli krátkému časovému trvání vystříknutí výstřiku a bez odvzdušnění by mohlo dojít k nebezpečnému zvýšení tlaku, nedokonalému vyplnění dutiny, k poklesu pevnosti studených spojů nebo ke spálení materiálu (kvůli tzv. Dieslovu efektu). Odvzdušňovací kanály se nacházejí v dělicí rovině naproti místu vtoku. Kanálky nesmí být zdrojem otřepů výstřiku. Při konstrukci odvzdušňovacích kanálků je třeba znát polohu umístění vtoku, umístění vyhazovačů, způsob zaformování výstřiku a jiné. Příklad formy, viz obr. 34.



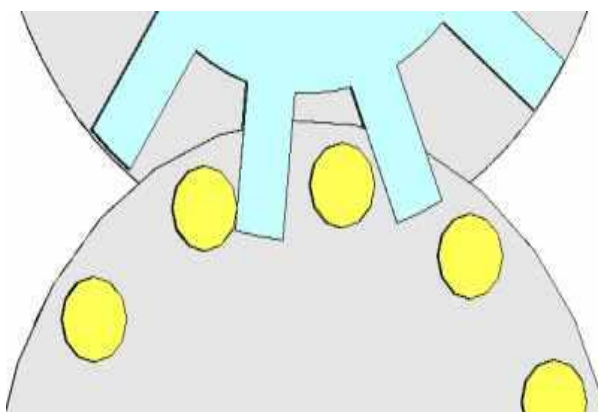
Obr. 34 Vstřikovací forma (vlevo tvárník, vpravo tvárnice) [29]

3 Návrh ozubeného kola [5, 26]

Ozubené kolo je strojní mechanická součást, která je tvořena zuby, nábojem a věncem. Slouží k přenosu točivého momentu. Více zabírajících kol spolu tvoří soukolí. Používají se pro převody se stálým převodovým poměrem a malou osovou vzdáleností hřídelů. Pokud spolu zabírají dvě ozubená kola, pak menší z nich se nazývá pastorek a větší z nich kolo nebo ozubené kolo. Součástí této práce je stručný návrh plastového ozubeného kola s ohledem na pevnostní a kinematické vlastnosti i s ohledem na zaměnitelnost za kovové ozubené kolo.

3.1 Historie ozubeného kola [28, 34]

Není známo kdo, kdy a kde přesně poprvé použil ozubené kolo, ale pravděpodobně tomu tak bylo učiněno ve starověku (4500 př. n. l. - 6. stol. n. l.). Materiálem bylo dřevo, které bylo v tehdejší době jedním z mála materiálů, které mohly být použity k aplikaci mechanického převodu, ať už z důvodu opracovatelnosti, dostupnosti nebo hmotnosti. Tvar zubu a jeho reprodukovatelnost byla velmi náhodná a pro tehdejší potřeby stačilo, když kolo uspokojivě přenášelo mechanickou energii, bez ohledu na účinnost převodu. Tvar ozubení mohl například vypadat jako je znázorněno, viz obr. 35 a obr. 36. Prvotní využití ozubení bylo pro aplikace ve vodních a větrných mlýnech a u různých druhů povozů. Obecně ale význam ozubeného kola vzrostl ve středověku s nástupem mechanických hodin a jiných mechanismů. Za předchůdce šnekového soukolí by se mohl považovat Archimédův šroub, zařízení, které popsal Archimedes (287-212 př. n. l.), když toto zařízení viděl při svých cestách v Egyptě. Časem se začala uplatňovat dřevěná kola se železnými zuby, celokovová kola a ve 20. století potom i kola plastová. Ta se začala více využívat po první světové válce, kdy nastal větší rozvoj a výzkum plastů. Ve 30. letech minulého století byla poprvé použita syntéza polyamidu, ze kterého se ozubená kola vyrábějí dodnes. Velkým průkopníkem kol na bázi polymeru je americká firma DuPont. Na trhu je již přes sto let a v dnešní době nabízí kvalitní materiály vhodné pro výrobu plastových kol. Dva nejpočetnější zástupci polymerních materiálů pro výrobu ozubených kol jsou materiály POM-H (obchodní značení firmy DuPont je Delrin) a PA 66 (obchodní značení firmy DuPont je Zytel). POM byl na trh uveden v roce 1958 v USA.



Obr. 35 Klecový převod (Lantern Gears) [23]



Obr. 36 Dřevěný mechanický převod [24]

3.2 Geometrie profilu boku zubu ozubeného kola [23]

Nejpoužívanější geometrie pro výrobu ozubených kol jsou cykloidní a evolventní. Tyto druhy jsou používány z důvodu požadavku rovnoměrného otáčení hnaného i hnacího kola a stálosti převodového poměru. Existují i jiné druhy tvarů jako Norvikovo nebo hypoidní.

Cykloidní ozubení se používají tam, kde je vyžadováno nižší tření, menší opotřebení a není zapotřebí přenést velký krouticí moment. V záběru je vždy jeden pár zubů. Vhodnou aplikací jsou například kolečka v hodinářství nebo jiné přesné mechanice či řetězová kola bicyklů.

Evolventní ozubení se používají pro strojírenské využití a přenášení velkých zatížení. V záběru bývají tři páry zubů. Výhodou je, že i při odchylce vzdálenosti os od teoreticky přesného výpočtu, nedojde k porušení přenosu konstantní rychlosti (rozdíl oproti cykloidnímu ozubení). Nástroje pro evolventní ozubení jsou jednodušší na výrobu.

3.3 Materiály pro výrobu ozubených kol [8, 30, 32, 33]

Pokud jde o základní porovnání kovových a plastových materiálů pro výrobu ozubených kol, je třeba se hned od začátku zaměřit na budoucí použití daného výrobku. Při rozhodování, který materiál vybrat, je třeba se zaměřit na dovolené zatížení, hlučnost, obvodovou rychlost, pracovní teplotu, požadovanou životnost, přesnost, cenu atp. I pro laika je zřejmé, že kovová kola budou mít vyšší únosnost než plastová, avšak ne vždy je zapotřebí přenést co největší výkon. Naopak může být vyžadována nízká hmotnost a hlučnost. V takových případech je vhodnější zvolit jako materiál některý z plastů.

- Kovové materiály

Struktura kovů je charakterizována krystalickou mřížkou. V kovech jsou atomy vázané tzv. kovovými vazbami, ve kterých jsou v uzlech pravidelné atomové mřížky uloženy kladné ionty, mezi kterými se volně pohybují některé elektrony jako tzv. elektronový plyn. Podstatný rozdíl mezi kovy a ostatními pevnými látkami tedy spočívá ve volné pohyblivosti velkého počtu elektronů a ve speciálnosti výše zmíněné kovové vazby, což je interakce mezi kladnými ionty a elektrony z nezaplňného vodivostního pásu (elektronový plyn). Existují různé druhy mřížek. Krychlová prostorově středěná (BCC), kterou má například chrom nebo železo pod 911 °C, krychlová plošně středěná (FCC), kterou má hliník, měď, nikl nebo železo nad 911 °C, a šesterečná (HCP), tu má například hořčík nebo titan.

Ozubená kola se neskládají z čistých prvků, ale jedná se o slitiny kovů. Nejčastější materiály pro výrobu ozubených kol jsou ocel (železo + do 2 % uhlík), šedá a tvárná litina (železo + od 2 % uhlík), mosaz (měď + zinek) a bronz (měď + cín).

Přehled vybraných materiálů vhodných pro kovová ozubená kola.

Oceli: Kola z ocelí jsou nejběžněji dostupné. Vyrábějí se ve všech možných modulech a velikostech. Používané materiály jsou oceli 11. nebo 12. třídy, ale lze vyrábět i z vysokolegovaných ocelí. Ty pak slouží především pro ozubení pracující v korozním prostředí.

Litiny: Slouží k méně zatíženým ozubením s neproměnným chodem a menší obvodové rychlosti. Zuby mají nízkou pevnost v ohybu a nesnášejí dobře rázy. Litinová kola se používají v záběru spolu s ocelovými. Šedá litina má oproti oceli lepší kluzné vlastnosti. Tvárná litina má lepší mechanické vlastnosti než šedá.

Bronzy: Dokáží zajistit dostatečnou pevnost, nízké tření i minimální opotřebení. Uplatňují se v soukolí spolu s ocelovým kolem.

Mosazi: Mají dostatečné mechanické vlastnosti, nízké tření a dobrou odolnost proti korozi. Jejich vyšší deformace rozkládá zatížení na více zubů. Používají se například pro kinematické převody v jemné mechanice.

- Plastové materiály

Plasty jsou složeny z makromolekulárních látek neboli polymerů. Jsou tvořeny makromolekulárními řetězci, tedy dlouhými molekulami s opakujícími se strukturami. Tyto řetězce mohou být (ale nemusí) mezi sebou propojeny chemickými vazbami. Prvky, které tvoří polymery, jsou uhlovodíky (tedy vodík a uhlík) a další prvky, jako například kyslík nebo dusík. Polymery se dělí na lineární a zesíťované.

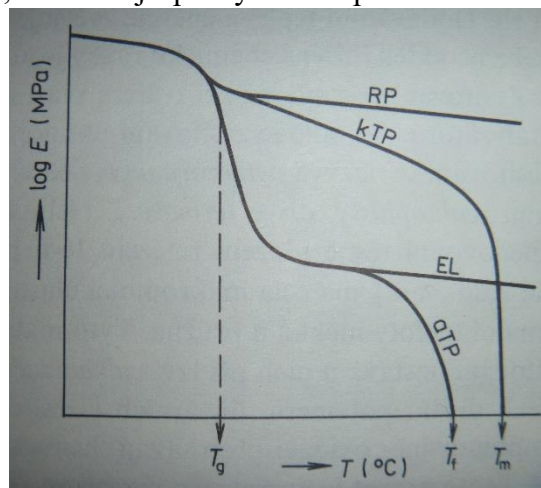
Lineární polymery mají makromolekulární řetězce hladké nebo s bočními skupinami. Díky Brownovu tepelnému pohybu jsou řetězce prostorově nepravidelně uspořádané, což vytváří amorfni strukturu, která je pro plasty typická. Někdy se makromolekuly uspořádají pravidelně a těsně a vytvoří krystalické útvary uložené mezi neuspořádanými oblastmi. Tento jev se nazývá semikrystalická struktura. Tyto materiály se nazývají termoplasty (amorfni a semikrystalické). Lze je opakovaně tavit a tvářet. Částečně tím však ztrácejí své mechanické vlastnosti.

Zesíťované polymery vytvářejí prostorovou trojrozměrnou síť. Pokud je dodávána energie, zvětšuje síť pohyblivost, ale řetězce nelze oddělit z důvodu příčných chemických vazeb. Tuto hmotu není možné roztavit. Zesíťování nastane vlivem teploty a tlaku. Jak je jednou zesíťování ukončeno, nelze dále tvářet. Toto husté příčné zesíťování se nazývá vytvrzování. Vytvrzené látky se nazývají reaktoplasty (dříve termosety). Pokud je chemických vazeb málo a zesíťování je řídké, má síť velkou pohyblivost, která se navenek projevuje měkce a pružně. Tyto látky se nazývají elastomery (kaučuky). Zesíťování u nich nastane při procesu vulkanizace. *Pro výrobu ozubených kol slouží téměř výhradně pouze termoplasty.*

Pokud jakékoli polymery příliš zahřejeme, přetrhávají se chemické vazby a hmota ztrácí pevnost. Tento proces je nazýván degradací polymeru.

Aby se dalo o těchto polymerních materiálech mluvit jako o plastech, je třeba k těmto polymerům přidat přísady. Teprve po přidání přísad lze o výsledném materiálu mluvit jako o plastru. Jako přísady slouží změkčovadla, barviva, stabilizátory, nadouvadla apod.

Pro mechanické využití plastů je třeba znát jejich stavy. Na rozdíl od kovů, které mohou existovat v tuhém, kapalném i plynném stavu, neexistují plasty kvůli přílišné velikosti makromolekul ve tvaru plynném. Existují však ve tvaru sklovitém, kaučukovitém a viskózním. Mezi stavem sklovitým a kaučukovitým se vyskytuje oblast skelného přechodu T_g . Chování polymerů je znázorněno, viz obr. 37. Sklovitý stav se vyznačuje tuhým stavem a dochází zde k pružným deformacím. Při přílišném zatížení dojde k porušení materiálu. Polymer je zde tvrdý a křehký. Kaučukovitý stav je charakterizován viskoelastickou deformací. Amorfni termoplasty a elastomery jsou zde měkké a pružně tvárné, semikrystalické pevné a houževnaté. Reaktoplasty měknou jen málo. Viskózní stav je u amorfni polymerů nad teplotou měknutí T_f , u semikrystalických nad teplotou tání krystalů T_m . Zesíťované polymery prakticky nemají viskózní stav.



Obr. 37 Závislost E [MPa] na t [°C] [8]

Od plastových ozubených kol jsou z důvodu dynamického namáhání, které zahrnuje ohyb v patě zubu, kontaktní tlak a smykové tření na boku zubu, požadovány tyto vlastnosti: vysoká mez únavy, nízké tření, vysoká ořezuvzdornost, rozměrová stabilita, odolnost proti chemickým a tepelným vlivům, tlumení rázů a chvění, rázová a vrubová houževnatost.

Přehled vybraných termoplastů vhodných pro plastová ozubená kola.

PA 6- Polyamid 6, (Silon): Vysoká vrubová houževnatost, odolnost proti otěru a tlumicí vlastnosti. Nevýhodou je vysoká navlhavost, nízký modul pružnosti a větší ohýbání. Při nízkých teplotách výrazné snížení houževnatosti. Vhodné pro vstřikování. Smrštění při tváření 1-2,5 %. Modul pružnosti v tahu v závislosti na vlhkosti 900-3200 MPa.

PA 66- Polyamid 66, (Nylon): Vysoká vrubová houževnatost, odolnost proti otěru a tlumicí vlastnosti. Vyšší mez únavy, lepší otěruvzdornost, větší pevnost a menší navlhavost než PA 6. Při nízkých teplotách výrazné snížení houževnatosti. Vhodné pro vstřikování. Smrštění při tváření 1-2 %. Modul pružnosti v tahu v závislosti na vlhkosti 1700-3000 MPa.

Polyamidy lze také používat s plněnými skleněnými vlákny.

APA-Alkalický polyamid: Odlévané kotouče, z nichž se obrábí ozubená kola, vhodný pro kusovou výrobu a velká kola. Vhodné pro zpracování odléváním.

POM-H-Polyformaldehyd, (Polyacetal homopolymer), (Delrin), $(\text{CH}_2\text{O})_n$: Velká pevnost a tuhost pramenící z vysoké krystalinity, citlivější na vruby než PA. Vyšší houževnatost za sucha a mrazu než PA, také horší tlumení než PA. Nízká navlhavost. Vhodný pro více zatížená kola bez rázového namáhání. Použitelný do cca 80 °C ve vodě, 100 °C na vzduchu. Dobrá odolnost proti creepu, nízký koeficient tření. Vhodné pro zpracování vstřikováním. Smrštění při tváření 1-3,5 %. Modul pružnosti 2800-3500 MPa. Se skleněnými vlákny až 8000 MPa. Délková teplotní roztažnost při 20 až 50 °C je 10 až $14 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Tedy více než u PA.

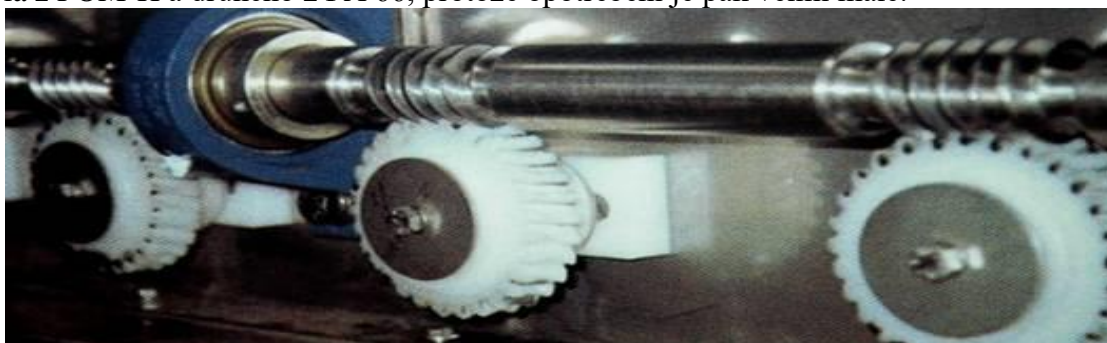
PUR zesíťovaný-Polyuretan zesíťovaný: Tvrdost 65 až 95 Shore A, pro velmi málo zatížená kola, vysoké tlumení, nehlukný chod, velmi dobrá odolnost proti otěru. Lze zpracovávat odléváním.

Kartit (vrstvy bavlněné tkaniny): Vysoká pevnost a houževnatost. Používaný pro malá tenká kola v elektronice. Vhodné pro použití vystřihování hotových kol z tenkých desek.

Textit (vrstvy bavlněné tkaniny): Vysoká pevnost a houževnatost. Používá se jako polotovar pro obrábění rozměrných kol. Dobrá rozměrová stabilita, lepší než u neplněných termoplastů. Dobrá otěruvzdornost. U jemnější struktury vyšší pevnost, ale menší odolnost proti rázům. Vhodný i pro moduly pod 2 mm.

PI- Polyimidy: Nízká teplotní roztažnost, dobrá otěruvzdornost, výborná tepelná odolnost od -200 do +260°C. Neodolává horké vodě, silným zásadám a stárnutí, odolává záření. Zpracování lisováním prášku za studena a spékáním výlisků, protože ho nelze roztavit. Modul pružnosti v tahu 3000 MPa.

Materiál spoluzabíraného kola je nejčastěji ocel, šedá litina nebo plast, viz obr 38. Měkká ocel s tvrdostí menší než 50 HRC působí velký otěr a odlupující se částičky působí na plastové kolo jako brusivo. Pokud spolu zabírají dvě plastová kola, je nutné pohybovat se v nižších obvodových rychlostech a pokud možno jen v občasném provozu, neboť plastová kola špatně odvádějí teplo z povrchu zubů a mohlo by dojít k přehřátí a zničení soukolí. Nejhorší variantou jsou dvě spoluzabírající plastová kola ze stejného materiálu. Vhodné je například použití jednoho kola z POM-H a druhého z PA 66, protože opotřebení je pak velmi malé.



Obr. 38 Ozubená kola z POM zabírající se šneky z oceli [31]

3.4 Hranice použití plastových kol [8]

- Přesnost plastových kol

Podle ČSN 64 0006 se tolerance tvářených plastových výrobků pohybují mezi IT 12 až 15. Pokud jsou zavedena zvláštní technologická opatření, lze vyrábět tvářením výrobky o hodnotě IT 10 nebo IT 9. Tvářením se rozumí např. vstřikování či lisování. S ohledem na smrštění při tváření je třeba měřit rozměry nejdříve po 24 h po vyjmutí výstřiku z formy. Měření probíhá při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 %.

Pokud jsou kola vyráběná technologií obrábění, pak lze dosáhnout i přesnějších tolerancí v řádu IT 8. I přesto je třeba brát v úvahu rozměrové změny, způsobené creepem, teplotní roztažností nebo navlhnutím. Při situacích, kdy plastový výrobek bude sloužit společně s kovovým, je třeba brát v úvahu, že kovové výrobky nenavlhají a jejich teplotní roztažnost lze oproti plastovým výrobkům zanedbat. S tímto ohledem je nutné navrhovat vůle a přesahy. Obecně lze říci, že u kovových kol lze dosáhnout vyšší přesnosti.

- Pracovní teplota plastových kol

Teplná odolnost plastů je v porovnání s kovy neporovnatelně nízká. Běžně dostupné levné plasty odolávají teplotám do cca 60 až 80 °C. Pro strojírenské účely využívané konstrukční plasty je maximální teplota cca 100 až 120 °C. U některých druhů plastů, jako např. polyimidů je maximální provozní teplota až přes 200 °C. Pod teplotou T_g křehnou všechny plasty. Například u celopolyamidového kola se při provozní teplotě 50 °C zvětší průměr o cca 0,1 až 0,3 %. Pokud spolu zabírají dvě plastová kola, je třeba celkové zvětšení vynásobit dvakrát. Z tohoto důvodu (i kvůli navlhavosti) by se měla boční vůle volit jako 0,05 až 0,2 m_n . Nižší hodnota platí pro případy plast-kov nebo při provozní teplotě do 50 °C. Např. materiál POM-H (Delrin) ztrácí při 65 °C 25 % své pevnosti.

- Obvodová rychlost a zatížitelnost plastových kol

Vyšší obvodové rychlosti způsobují větší vývin třecího tepla, rychlejší opotřebení a kratší životnost. Pro nemazaná soukolí kov-plast jsou dovolené rychlosti 5 až 8 m/s, pro stejná soukolí používající olejové mazání 15-20 m/s. U soukolí plast-plast je doporučená rychlost max. 1-2 m/s. Příliš velká obvodová rychlost způsobuje termické poškození zubových boků a deformace zubů. Plastová kola špatně odvádějí teplo z povrchu zubů. Zatížitelnost ozubených kol je omezena kvůli nízkému modulu pružnosti v tahu plastových materiálů, pramenícího z nepřítomnosti kovové vazby a přílišné velikosti molekul. Kovy mají modul pružnosti v tahu řádově stovky tisíc MPa, plasty řádově stovky nebo tisíce MPa.

3.5 Využití recyklovaných materiálů [35]

Plasty jsou v 21. století všudypřítomné a bez jejich aplikací si jen těžko lze představit drtivou většinu všech výrobků. Recyklovatelné však nejsou všechny druhy plastů. Zpravidla se recyklují pouze termoplasty. Jelikož se z reaktoplastů ozubená kola nevyrábí, tato problematika nebude dále zpracována. Obecně je problémem špatné třídění vratného materiálu, což způsobuje problémy se zpracováním. Teoreticky je možné roztavit poškozená plastová ozubená kola a vyrobit z nich nové výrobky. Jde však spíše o produkty nižší kvality o nižších mechanických vlastnostech. Lze ovšem přidávat tento materiál do panenského polymeru. Při správném poměru lze znovu vyrobit ozubené kolo o dostatečné kvalitě.

V tomto porovnání jsou lepší kovová ozubená kola, která jsou recyklovatelná s vyšší účinností, neboť kromě rzi a povrchové nečistoty, která se oddělí při dalším zpracování například do strusky, se zbytek kovu roztaví a zpracuje téměř beze zbytku.

Novinkou ve výrobě ozubených kol je použití bioplastů, jejichž rozvoj je v současné době na vzestupu. Konkrétně se jedná o biopolyamid. Fosilní složka je nahrazena biosložkou pocházející z ricinového oleje. Do tohoto rozvoje bioplastů se angažují i velké automobilky jako Mazda nebo Toyota.

3.6 Typ navrhovaného ozubeného kola [1, 8, 37]

Jako navrhované plastové ozubené kolo bylo vybráno plastové ozubené kolo z materiálu POM-H (Delrin) vyráběné technologií vstřikování. Jeho předlohou je kovové ozubené kolo z převodovky motocyklu ČZ 175-453, viz obr 39. Série bude 1 000 ks, aby se vyplatila technologie vstřikování. Cílem je zhodnotit technologičnost výroby a funkčnost ozubeného kola z plastu.

- Zhodnocení technologičnosti

Ozubené kolo bude pracovat v olejové lázni. Spoluzabírající kolo bude z oceli, počet zubů 46. Průměr hlavové kružnice zadaného kola je 50 mm, počet zubů 23. Tabulka s hodnotami viz příloha 6.

- Výpočet obvodové rychlosti



Obr. 39 Ozubené kolo motocyklu ČZ 175

Motocykl může dosáhnout nejvyšších otáček 4750 ot/min. Pokud je uvažováno, že je plastový pastorek hned na výstupu klikového hřídele, pak se obvodová rychlost řeší pomocí vztahu (3.1)

$$v = \omega \cdot r = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{d}{2}}{60} = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} [m \cdot s^{-1}], \quad (3.1)$$

kde: v - obvodová rychlost [m/s]
 ω - úhlová rychlost [1/min]
 r - poloměr roztečné kružnice [m]
 d - průměr roztečné kružnice [m]
 n_I - otáčková frekvence [1/min]

Pokud by pastorek nebyl hned na výstupu hřídele, ale byl by umístěn jinde v převodovce, muselo by se počítat s převodovými poměry, s jinými otáčkami, a tedy úhlovou rychlostí a jinými průměry ozubených kol.

Po dosazení vyjde obvodová rychlost 11,44 m/s.

$$v = \frac{\pi \cdot 0,046 \cdot 4750}{60} = 11,44 m \cdot s^{-1}$$

- Výpočet obvodové síly a krouticího momentu

Obvodová síla se vypočte ze vztahu (3.2)

$$F_t = \frac{2000 \cdot M}{d} [N], \quad (3.2)$$

kde: F_t - obvodová síla [N]
 M - krouticí moment [Nm]
 d - průměr roztečné kružnice [mm]

Pro zjištění obvodové síly je zapotřebí vypočítat krouticí moment. Ten je pak zjištěn ze vztahu (3.3)

$$M = 9550 \cdot \frac{P[kW]}{n_{[min^{-1}]}} [Nm], \quad (3.3)$$

kde: P - je výkon motocyklu [kW]
 n_I - otáčková frekvence motocyklu [min⁻¹]

Výkon motocyklu je dle technického průkazu 7,4 kW.

Po dosazení vyjde krouticí moment u 4750 otáček za minutu 14,88 Nm a obvodová síla 647 N.

$$F_t = \frac{2000 \cdot 14,88}{46} = 647 \text{ N}$$

$$M = 9550 \cdot \frac{7,4}{4750} = 14,88 \text{ Nm}$$

Výpočet krouticího momentu je orientační, protože při nižších otáčkách, lze dosáhnout i o něco vyššího krouticího momentu. Tyto informace však nejsou dostupné, proto je výpočet omezen na hodnotu krouticího momentu při maximálních otáčkách.

- Pevnostní výpočet

Pro zadané ozubené plastové kolo se bude řešit ohybové a kontaktní namáhání. Zub bude uvažován jako vetknutý nosník namáhaný pouze prostým ohybem.

Výpočet ohybového napětí v patě zubu bude vypočten dle ČSN 01 4686. Tento typ výpočtu je zjednodušený a platí pro čelní ozubená kola s přímým a šikmým ozubením. Hodnoty skutečného stavu napjatosti v jednotlivých místech zubu nejsou známy, proto se pevnostní výpočet omezuje na výpočet ohybového namáhání v patě zubu a kontaktního namáhání na povrchu boku zubu. Pevnostní výpočet se uvažuje pro ideálně tuhé zuby, které se při záběru nedeformují. V reálu se plastové zuby ohýbají a v záběru je pak více párů zubů. Součinitel trvání záběru ε_α se pak zvětší. Ohybové napětí se vypočte dle vztahu (3.4), čemuž předchází výpočet obvodové síly působící na jednotku šířky zubu (3.5) a součinitele tvaru zubu (3.6)

$$\sigma_F = \frac{w_{Ft}}{m_n} \cdot Y_F \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_\beta \leq \sigma_{FP} \text{ [MPa]}, \quad (3.4)$$

$$w_{Ft} = \frac{F_t}{b_w} \text{ [N.mm}^{-1}\text{]}, \quad (3.5)$$

$$Y_\varepsilon = 1/\varepsilon_\alpha \text{ [-]}, \quad (3.6)$$

kde: σ_F - srovnávací ohybové napětí v patě zubu = σ_o [MPa]
 F_t - obvodová síla působící na roztečné kružnici [N]
 m_n - normální modul [mm]
 w_{Ft} - obv. síla působící na rozt. kružnici na jednotku šíř. zubu [N.mm⁻¹]
 b_w - účinná šířka zubu [mm]
 Y_F - součinitel tvaru zubu [-]
 Y_ε - součinitel vlivu trvání záběru evolventy [-]
 ε_α - součinitel trvání záběru evolventy [-]
 Y_β - součinitel sklonu zubu [-]
 σ_{FP} - přípustné ohybové napětí v patě zubu [MPa]

Vypočítaná hodnota F_t je 647 N, normální modul je 2 mm, šířka zubu b_w je 10 mm, koeficient Y_F je 2,4, viz příloha 1, koeficient Y_ε je 0,5, viz příloha 2, koeficient Y_β je 1, protože sklon zubu je nulový.

Po dosazení vyjde srovnávací ohybové napětí 40,4 MPa, které musí být menší než přípustné.

$$\sigma_F = \frac{64,7}{2} \cdot 2,4 \cdot 0,5 \cdot 1 = 38,8 \text{ MPa} \leq \sigma_{FP} \quad (38,8 \text{ MPa} \geq 25 \text{ MPa} \rightarrow \text{nevyhovuje})$$

Přípustné ohybové napětí v patě zubu může být jen 25 MPa, viz příloha 3, tudíž kolo na srovnávací ohybové napětí v patě zubu nevyhovuje.

Výpočet u kontaktního namáhání probíhá přes Hertzův tlak od síly F_n a třecí síly T . Třecí síla je pro její neznalost zanedbávána. Vliv třecí síly by se objevil při experimentálním měření dovoleného Hertzova tlaku. Teoretická hodnota Hertzova tlaku se vypočte ze vztahu (3.7)

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{w_{Ht}}{d} \cdot \frac{u+1}{u}} \cdot Z_H \cdot Z_M \cdot Z_\varepsilon \leq \sigma_{HP}, \quad (3.7)$$

kde: σ_H - Hertzův tlak ve valivém bodě [MPa]
 $u = z_2/z_1$ - poměr počtu zubů kola a pastorku [-]
 Z_H - součinitel tvaru zubu [-]
 Z_M - součinitel materiálu [-]
 Z_ε - součinitel součtové délky stykových čar boků zubů [-]
 σ_{HP} - přípustný Hertzův tlak [MPa]

Zadané nebo dříve vypočítané hodnoty jsou, $u=2$, Z_H je 1,8, viz příloha 4, E_1 (ocel)=210000 MPa, E_2 (POM)=1400 MPa, $\mu_1=0,3$, $\mu_2=0,4$, viz příloha 5.

$$Z_M = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}} = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot \left(\frac{1-0,3^2}{210000} + \frac{1-0,4^2}{1400} \right)}} = 32,46 \quad [-], \quad (3.8)$$

kde: $\mu_{1,2}$ je Poissonovo číslo materiálu pastorku a kola [-]
 $E_{1,2}$ -modul pružnosti materiálu pastorku a kola [MPa]

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{4-\varepsilon_\alpha}{3}} = \sqrt{\frac{4-2}{3}} = 0,82 \quad [-], \quad (3.9)$$

Pro zjištění koeficientů Z_M a Z_ε slouží vztahy (3.8) a (3.9). Po dosazení již známých hodnot do vzorce (3.7) vyjde Hertzův tlak 73,36 MPa.

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{67,4}{46} \cdot \frac{1,5+1}{1,5}} \cdot 1,8 \cdot 32,46 \cdot 0,82 = 73,36 \text{ MPa} \leq \sigma_{HP}$$

(73,36 \geq 40 MPa \rightarrow nevyhovuje)

Přípustný Hertzův tlak je 40 MPa, viz příloha 5, vypočítaný Hertzův tlak je 73,36 MPa tudíž kolo nevyhovuje.

- Výpočet rozměrů v důsledku smrštění

Vzhledem ke zvolené technologii vstřikování je zapotřebí počítat s tvářením při smrštění. Praxí ověřené vzorce napomáhají k přesnému vytvoření formy, a tudíž i k přesnému vytvoření výrobku s ohledem na smrštění. Smrštění se odvíjí i od tloušťky vstřikovaného výrobku. Materiál Delrin má smrštění v rozmezí od cca 1,8 do 2,2 v závislosti na tloušťce stěny, na typu Delrinu a na vstřikovacím tlaku a teplotě. V důsledku nedostatku informací o případném vstřikovacím procesu je zvoleno smrštění $s = 2 \%$. Vzorce viz (2.1), (2.2), (2.3).

$$\cos 20 = (1 + 0,02) \cdot \cos \alpha'$$

$$\alpha' = 22,89^\circ$$

$$m = 2 \cdot (1 + 0,02) = 2,04 \text{ mm}$$

$$D = 23 \cdot 2,04 = 46,92 \text{ mm}$$

3.7 Vyhodnocení zaměnitelnosti plastového kola za kovové [2, 39]

V předešlých kapitolách bylo teoreticky vypočteno, že v této konkrétní aplikaci není možné nahradit kovové kolo kolem plastovým. Přípustné napětí a tlaky přesahují mezní hodnoty, které pro materiál POM-H udává výrobce. Za určitých technologických úprav by bylo možné, aby plastové kolo fungovalo. Možnými úpravami jsou například zvětšení šířky ozubeného kola nebo použití kovového kola s nastříknutou plastovou vrstvou. Jiná modernější literatura uvádí, že lze sestavit plastovou planetární převodovku, která dokáže odolat točivému momentu, který je produkován 18 kW motorem při 6000 ot.min⁻¹. Proto je možné, že by výměna byla uskutečnitelná, musely by však proběhnout praktické zkoušky.

4 Porovnání technologií z technického a ekonomického hlediska

Pro porovnání některých aspektů jednotlivých technologií byla vypracována tabulka, která přibližuje, k čemu jsou například některé technologie vhodné a co je například jejich nevýhodou. Tyto údaje lze prohlédnout, viz tab. 1.

Tab. 1 Porovnání výrobních technologií pro výrobu ozubených kol

Výrobní technologie								
	Cena výrobku	Doporučená velikost kol	Přesnost v IT	Nutnost dalšího zprac.	Rychlost výroby	Počáteční investice	Velikost série	Materiál výrobku
Kování	****	S,V	16-12 (7)	ANO	****	**	VS	Kov
Odlévání	***	(M),S, V, G	18--12	ANO	***	**	MS	Kov
Odlévání	***	M,S	18-14	NE	***	***	K/MS	Plast
Svařování	*	G	-	ANO	*	****	-	Kov
3D -tisk	*	M,S	12--7	NE/ANO	*	**	K	Kov
3D -tisk	**	M,S	12--7	NE	*	*****	K	Plast
Stříhání	*****	M,S	11-9 (6)	NE	*****	***	VS	Kov
Stříhání	*****	M,S	11--9	NE	*****	***	VS	Plast
Paprskové řezání	****	M,S,V	14--7	NE	***	**	MS	Kov
Obrábění	***	M,S, V	8--2	NE	**	****	MS/VS	Kov
Obrábění	****	M,S, (V)	10--8	NE	**	****	MS	Plast
Vstřikování	*****	M,S	15-12 (9)	NE	*****	*	VS	Plast

Legenda:

Hvězda - škála od jedné do pěti hvězd. Čím více hvězd, tím lépe je na tom daná technologie.

Cena výrobku - jedna hvězda= výrobek je dražší, pět hvězd= výrobek je levnější.

Doporučená velikost kol - M- malé průměry s malým modulem, S- střední, V- velké, G- gigantické.

Přesnost v IT - bez závorek běžně dosahovaná přesnost, v závorkách za zvláštních ujednání.

Nutnost dalšího opracování - uvedené údaje za běžných podmínek (např. kování kyvnou zápustkou ale nevyžaduje další opracování, kap. 2.1.1).

Rychlost výroby - orientační údaje, které udávají poměrnou dobu vyrobení jednoho výrobku v poměru k ostatním technologiím. Jedna hvězda= pomalejší, pět hvězd= rychlejší.

Počáteční investice - orientační údaje zohledňující investiční náklady na stroj/nástroj (jedna hvězda= dražší, pět hvězd= levnější).

Velikost série - K- kusová výroba, MS- malosériová výroba, VS- velkosériová výroba.

Materiál výrobku - běžné materiály používající se pro danou technologii.

Pozn.- Uvedené údaje jsou pouze orientační a v různých aplikacích se mohou lišit, v tabulce je uvažována výroba za běžných podmínek.

4.1 Porovnání ozubených kol z materiálového hlediska [1, 2, 28, 34, 38]

Za konvenční technologii výroby ozubených kol kovových lze označit obrábění. Konvenční technologii u plastových ozubených kol lze označit za vstřikování. Za konvenční je v tomto případě myšleno nejvíce využívané. Pokud jsou vyřešeny konstrukční požadavky výrobku a vyhovuje jak varianta s kovovým i plastovým kolem, pak je nutné si uvědomit, že pracnost výroby jednoho plastového kola technologií vstřikování je mnohonásobně nižší než pracnost výroby kovového kola vyrobeného obráběním (např. frézováním). Spolu s pracností souvisí i čas výroby, který opět příznivěji vyznívá pro vstřikovaná kola, neboť rychlost výroby jednoho výstřiku se pohybuje od několika sekund do několika minut, v závislosti např. na velikosti kola a násobnosti formy. Rychlost výroby frézovaného kola je v řádu minut až hodin, v závislosti např. na velikosti kola, materiálu, chlazení či opotřebení nástrojů.

Výhod, kvůli kterým se používají plastová ozubená kola je mnoho. Zde je výčet těch nejdůležitějších:

- Snížená hlučnost.
- Odolnost proti korozi.
- Nižší hmotnost.
- Levnější výroba.
- Více možností konstrukčních řešení a variabilit tvarů.
- Tlumení vibrací a rázů.
- Lepší kluzné vlastnosti.
- Nižší cena výrobku.
- Větší a rychlejší výrobnost.
- Nižší pracnost.

Důvodů, které omezují použití plastových ozubených kol, je také více, opět jsou zde uvedeny nejdůležitější nevýhody oproti kovovým kolům:

- Nižší obvodové rychlosti.
- Nižší únosnost.
- Nižší počet pracovních cyklů.
- Horší možnost oprav.
- Vyšší spotřeba ropy.
- Menší recyklovatelnost z důvodu nerozšířeného třídění plastových výrobků.
- Horší rozměrová stabilita při výrobě a provozu.
- Omezené mechanické vlastnosti v závislosti na teplotě.

5 Závěry

Při porovnávání technologií nelze jednoznačně určit, která z nich je nejlepší, nejefektivnější nebo nejvhodnější. Vždy záleží, pro jaké účely a v jakých podmínkách má ozubené kolo sloužit. Z práce však vyplývá, že při požadavku velké série kol, která nemusejí přenášet velké zatížení a nebudou pracovat při obvodových rychlostech nad cca 15 m.s^{-1} , se vyplatí použít technologii vstřikování plastových kol, protože tato výroba bude nejekonomičtější i s ohledem na poměrně vysokou pořizovací cenu stroje i formy. V dnešní době jsou dostupné normalizované díly na vstřikovací formy, což zlevňuje výrobu formy. Pokud budou požadavky na ozubené kolo, které má být velmi přesné, potom je vhodné zvolit kovové ozubené kolo, které je vyráběné například frézováním či obrážením. Pro dosažení ještě větší přesnosti se doporučuje zařadit za frézovací operaci operace broušení, které zlepší jak přesnost, tak i drsnost povrchu. Významným parametrem moderních ozubených kol je hlučnost, která je řešena především u mechanismů, které se objevují v domácích přístrojích, které pracují v bezprostřední blízkosti člověka. Tento parametr je často zohledňován u návrhu, zda použít kovové nebo plastové kolo. Plastová kola mají obecně tišší chod. Často stačí mezi soukolí kovových kol vložit jedno plastové a vibrace a rázy způsobující hlučnost se dál nepřenášejí. Budoucí možné problémy s nedostatkem ropy mohou ovlivnit výrobu plastových kol z klasických používaných plastů. Rozvoj bioplastů by ovšem mohl tento případný problém vyřešit. Z hlediska technologie výroby však druh plastového materiálu nehraje zásadní roli.

U konkrétního ozubeného kola z praktické části práce, kde byla zvažována výměna kovového kola motocyklu ČZ 175/453 za plastové, bylo zjištěno, že nejde o vhodnou úpravu, neboť by plastové kolo nevyhovělo v kontaktním namáhání Hertzovým tlakem, ani v ohybovém napětí v patě zubu. Konstrukčními úpravami či plněními plastovými materiály by se však dala zvýšit únosnost, která by teoreticky umožnila použití plastového ozubeného kola. Plastová kola se zřejmě nikdy nevyrovnají pevnostními vlastnostmi kolům kovovým, v budoucnu však lze díky jejich stálému vývoji předpokládat, že je bude možné využívat ve stále více aplikacích.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MORAVEC, Vladimír. Konstrukce strojů a zařízení II: čelní ozubená kola. 1. Ostrava: Montanex, 2007. ISBN 80-7225-051-5.
2. *Průmyslové spektrum MM: Perspektivy plastových ozubených převodů* [online]. 2014, **2014**(7) [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/perspektivy-plastovych-ozubenych-prevodu.html>
3. Vítkovice heavy machinery a.s. In: *60t ozubené kolo a pastorek s šípovými ozubením* [online]. Vítkovice: Vítkovice heavy machinery, 2013 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://brtnik5.vitkovice.cz/news/message/detail/id/1387/lang/cs/site/18>
4. Šnekové ozubené kolo 26Z / 1,5 - 2, modul 0.2mm. In: *Www.pojezdy.eu* [online]. Praha: Pojezdy.eu [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.pojezdy.eu/eshop/alsracing-delrinova-snekova-odvalovana-kola-modul-02/339-alsracing-sikme-ozubene-kolo-26z-15-2-modul-02mm.html>
5. ŠRITR, Jan. *Ozubené převody* [online]. Nové Město nad Metují, 2011 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://dum.spsnome.cz/2011/tp/sr/sr-tp-sps-03-02-Ozubene-prevody.pdf>
6. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění- 2. část* [online]. Brno, 2004 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně.
7. VYHNANOVSKÝ, Jaroslav. *Návrh technologie výroby ozubeného kola z plastu* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/40365>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Bohumil Kandus.
8. KOLOUCH, Jan. *Strojní součásti z plastů*. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981. ISBN 04-234-81.
9. KREJČÍ, Martin. Nedestruktivní zkoušení odlitků ozubených kol. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009, 68 stran. Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.
10. ZEMČÍK, Ladislav. *Slévárenská technologie* [online]. Brno [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenskvi/sites/default/files/clanky/slevarenska-technologie/slevtech.pdf>
11. *MM Průmyslové spektrum: Výroba/tváření- Kování výkynnou zápusťou a přesné kování* [online]. **2012**(6) [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kovani-vykynnou-zapusťou-a-presne-kovani.html>
12. PODANÝ, Kamil. *Pěchování, zpětné protlačování* [online]. In: . Brno, 2007 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/ctt__technologie_tvareni__cviceni_1__podany.pdf
13. Ozubené kolo. In: *Zetor kovárna* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.zetorkovarna.cz/ozubene-kolo>
14. Ratchet gears. In: *Photo gallery* [online]. 2001 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: http://www.berneenterprises.com/images/6pc_gear_with_gating_and_risring_39lb.jpg
15. Tymo Mantle Clock repair by Blackmore's Watch and Clock Repair.wmv. In: *Youtube* [online]. Great Britain, 2010 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=VTHoyaAq8Ko>
16. TIG, MIG navařování (svařování). In: *MEPAC CZ: Navaření ozubení* [online]. Třinec, 2017 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.mepac.cz/cz/presne-strojirenskvi/tig--mig-navarovani--svarovani->
17. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Technology. In: *Youtube* [online]. 2013 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=bgQvqVq-SQU>
18. Selective laser sintering. *3d-tisk* [online]. 2014 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
19. What laser cutter can create laser cutting metal gear cutting. In: *Youtube* [online]. 2016 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=9yg_NZKaFnA

20. KOCMAN, Luděk. Technologie paprskového řezání: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 60s.. Vedoucí práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.
21. LENFELD, Petr. *Technologie plošného tváření - stříhání* [online]. Liberec, 2008 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/06.htm
22. Výroba ozubení 2.R. *Sps-vitkovice* [online]. Vítkovice: Večeřová, 2014 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/STT/V%C3%BDroba%20ozuben%C3%AD%202.R-UT.pdf>
23. Gears. *Gary's clocks* [online]. 2013 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://garysclocks.sawdustcorner.com/gears.html>
24. PFEIFER, Ralf. Kronrad2. In: *Wikimedia* [online]. München, 2005 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kronrad2.jpg>
25. SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK, KŘUPKA, Ivan, ed. *Základy konstruování*. Páté. Brno: CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-839-7.
26. Historie plastů. *Lisovna plastů* [online]. Brno, 2014 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://lisovna-plastu.blogspot.cz/2011/01/historie-plastu.html>
27. JOSEF, Sedlák. *Aditivní technologie: Metody Rapid Prototyping*. Brno, 2015. Přednáška z předmětu: Speciální technologie výroby. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Strojírenská technologie.
28. Making Mechanical Gears Lighter, Quieter and Longer-Lasting. *DuPont: Mechanical gears* [online]. USA, 2015 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/plastics-polymers-resins/thermoplastics/uses-and-applications/mechanical-gears.html>
29. LENFELD, Petr. *Technologie II: Zpracování kovů, zpracování plastů* [online]. Liberec, 2008 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
30. ŘEZÁČ, Matěj. *Výroba ozubeného kola různými technologiemi* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/31435>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Kalivoda.
31. *EPP Plasty: Ertacetal* [online]. 2012 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.eppplasty.cz/ertacetal.php>
32. *Websnadno: Vnitřní struktura kovů* [online]. 2010 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-st-05_vnitrnistrukturakovu.pdf
33. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [online]. 1963, 8(4) [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/138284/PokrokyMFA_08-1963-4_4.pdf
34. SOVA, Miloš a Josef KREBS. *Termoplasty v praxi*. 1. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. ISBN 80-8622--15-7.
35. VÖRÖS, František. Bioplasty: Nový problém pro odpadáře/ IV. *Profipress: Odpady-online* [online]. 2013 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://odpady-online.cz/bioplasty-novy-problem-pro-odpadare-iv/>
36. ŘEHULKA, Zdeněk. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů*. Brno, 2001.
37. *Du Pont: Bezeichnungen für Konstruteure*. München, 1970.
38. ERHARD, Gunter. *Designing with Plastics*. 1. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006. ISBN 978--446-22590-9.
39. Acetal Gears Demonstrate Drivetrain Performance. *DuPont* [online]. Illinois, 2016 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/plastics-polymers-resins/thermoplastics/articles/acetal-gears-lighter-drivetrains.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotka
b_w	Účinná šířka zubu	[mm]
D	Průměr šneku	[mm]
D_1	Korigovaný průměr základní kružnice	[mm]
d	Průměr roztečné kružnice	[m]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
F_t	Obvodová síla	[N]
h	Hloubka	[mm]
l	Délka zdvihu	[mm]
M	Krouticí moment	[Nm]
m	Modul ozubení	[mm]
m_1	Korigovaný modul dutiny formy	[mm]
m_n	Normální modul	[mm]
m'	Modul výstřiku ozubeného kola	[mm]
n	Otáčky	[min ⁻¹]
n_1	Otáčková frekvence	[min ⁻¹]
n_n	Otáčky nástroje	[min ⁻¹]
n_0	Otáčky obrobku	[min ⁻¹]
P	Výkon motocyklu	[kW]
r	Poloměr roztečné kružnice	[m]
s	Smrštění	[% .100 ⁻¹]
T_g	Oblast skelného přechodu	[°C]
T_f	Teplota měknutí	[°C]
T_m	Teplota tání krystalů	[°C]
u	Poměr počtu zubů	[-]
v	Obvodová rychlost	[m.s ⁻¹]
v_c	Střední hodnota řezné rychlosti	[m.s ⁻¹]
v_f	Posuvová rychlost	[m.s ⁻¹]
v_z	Střední hodnota zpětného pohybu	[m.s ⁻¹]
w_{Ft}	Obvodová síla působící na roztečné kružnice	[N.mm ⁻¹]
Y_F	Součinitel tvaru zubu pro ohybové namáhání v patě zubu	[-]
Y_β	Součinitel sklonu zubu	[-]
Y_ε	Součinitel trvání záběru evolventy	[-]
Z_H	Součinitel tvaru zubu pro namáhání Hertzovým tlakem	[-]
Z_M	Součinitel materiálu	[-]
Z_ε	Součinitel součtové délky stykových čar boků zubů	[-]
z	Počet zubů	[-]
α'	Úhel záběru dutiny formy	[°]
α	Úhel záběru výstřiku	[°]
ε	Úhel natočení segmentu ozubení	[°]
ε_1	Další úhel natočení segmentu ozubení	[°]
σ_F	Ohybové napětí v patě zubu	[MPa]
σ_{FP}	Přípustné ohybové napětí v patě zubu	[MPa]
σ_H	Hertzův tlak	[MPa]
σ_{HP}	Přípustný Hertzův tlak	[MPa]
ω	Úhlová rychlost	[min ⁻¹]

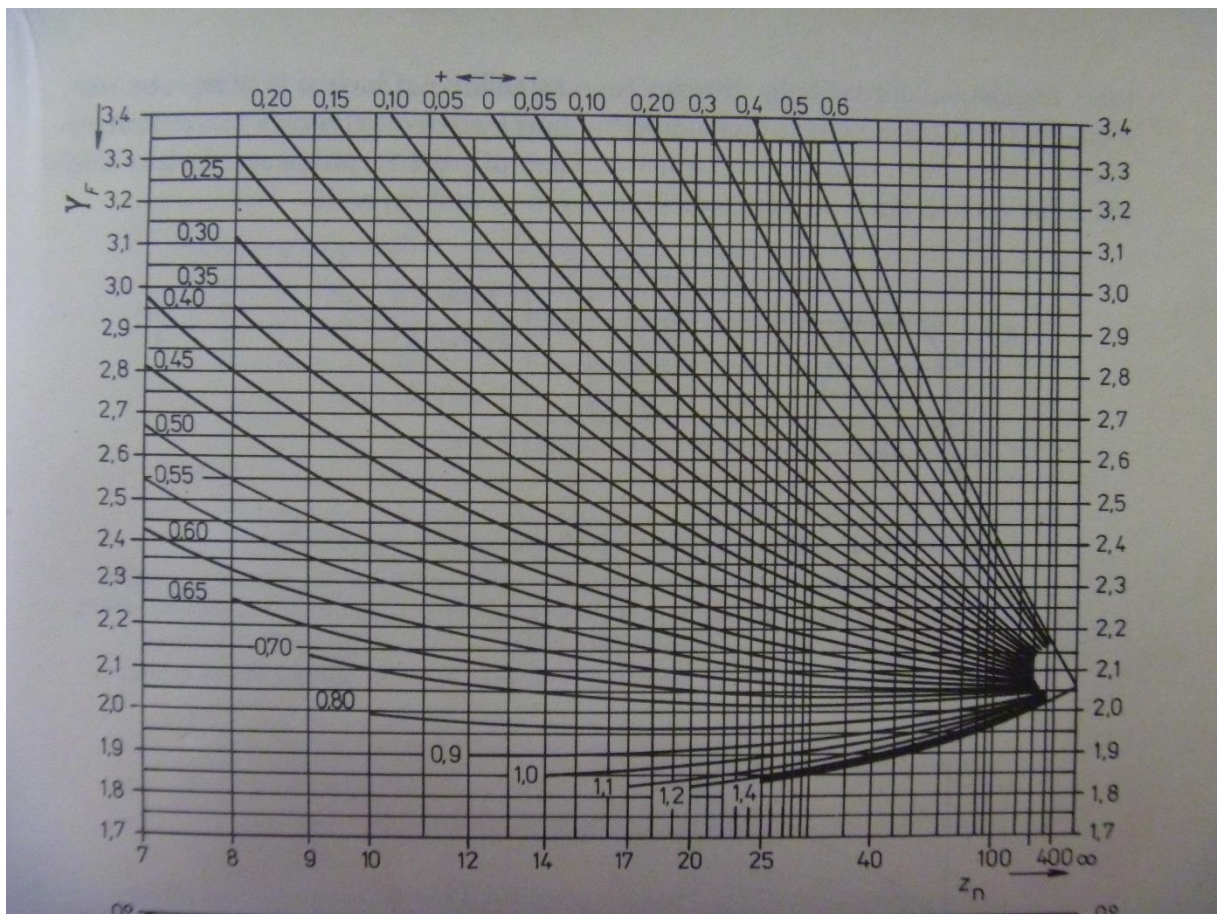
SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Kolo se šípovým ozubením (60 t) [3]	9
Obr. 2 Šneková ozubená kola, 26 zubů [4]	9
Obr. 3 Planetová převodovka v náboji Rohloff SpeedHub 500/14 [5]	11
Obr. 4 Průběh vláken – obráběná součást (vlevo), kovaná součást (vpravo) [12]	12
Obr. 5 Výkovek kovaný na lisu [13]	12
Obr. 6 Soustava odlévaných ozubených kol [14]	13
Obr. 7 Kolečko do hodin, (vpravo před, vlevo po) [15]	14
Obr. 8 Zavařené zuby [16]	14
Obr. 9 Součást vyrobená technologií DLMS [17]	14
Obr. 10 Řezání ozubeného kola laserovým paprskem [19]	15
Obr. 11 Frézování čelního ozubení kotoučovou frézou: a) přímé zuby b), šikmé zuby [6]	16
Obr. 12 Odvalovací frézování [6]	16
Obr. 13 Kinematika pohybů čelního obrázení metodou Maag [6]	17
Obr. 14 Kinem. pohybů čel. obrázení Fellows [6]	17
Obr. 15 Protahování vnějšího zubu [22]	18
Obr. 16 Broušení čelních ozubených kol dělicím způsobem: a) dva kotouče s profilem ve tvaru boku zubu, b) jeden kotouč s profilem ve tvaru zubové mezery [6]	18
Obr. 17 Broušení čelního ozubení s odvalem boku zubu a) broušení Maag pomocí kotoučů skloněných pod úhlem záběru, b) broušení Maag kolmo postavenými kotouči, c) broušení Niles, 1- obrobek, 2- brousící kotouče, 3- příčný suport, 4- podélný suport, 5- odvalovací kotouč, 6- ocelový pás, 7- stojan odvalovacího zařízení [6]	19
Obr. 18 Broušení odvalovacím způsobem [6]	20
Obr. 19 Nástroj pro honování s diamantovým brusivem [6]	20
Obr. 20 Kinematické schéma obrázení ozubení kuželového kola podle šablony [6]	21
Obr. 21 Frézování kuželového kola s paloidním ozubením metodou Klingelnberg 1- obráběné kolo, 2- kuželová odval. fréza, 3- unášecí deska, 4- pomyslné základní kolo [6]	22
Obr. 22 Schéma výroby válcového šneku: 1- soustružení tvarovým nožem, 2- frézování kotoučovou frézou, 3- broušení tvarovým kotoučem [6]	23
Obr. 23 Odvalovací frézování šnekových kol [6]	23
Obr. 24 Nástroj a obrobek [6]	23
Obr. 25 Úpravy pro snížení tlaku pera v drážce a) prodloužený náboj b) vsazený přišroubovaný kov. Náboj c) příložné kov. desky stažené šrouby	24
Obr. 26 Obráběná kola, a) celoplastová, b) přišroubovaný věnec ke kovovému kotouči [8] ..	24
Obr. 27 Planetová převodovka vyrobená technologií 3D tisku (vnější průměr 150 mm)	25
Obr. 28 Souhrn základních vlastností jednotlivých metod Rapid prototyping [27]	25
Obr. 29 Vylehčený tvar vstřikovaného kola (m-modul ozubení), a) souměrné kolo, b) nesouměrné kolo [8]	26
Obr. 30 Dva typy odlehčené stojiny, směr malého smrštění- přeruš. šípka, směr velkého smrštění- plná šípka [8]	26
Obr. 31 Vystříknuté kolečko a hřídel 1- ozubení, 2- kluzné ložiskové plochy, 3- vačka, 4- hřídel [8]	27
Obr. 32 Vstřikovací cyklus [29]	27
Obr. 33 Schéma vstřikovacího stroje [29]	28
Obr. 34 Vstřikovací forma (vlevo tvárník, vpravo tvárnice) [29]	29
Obr. 35 Klecový převod (Lantern Gears) [23]	30
Obr. 36 Dřevěný mechanický převod [24]	30
Obr. 37 Závislost E [MPa] na t [°C] [8]	32
Obr. 38 Ozubená kola z POM zabírající se šneky z oceli [31]	33
Obr. 39 Ozubené kolo motocyklu ČZ 175	35

SEZNAM PŘÍLOH

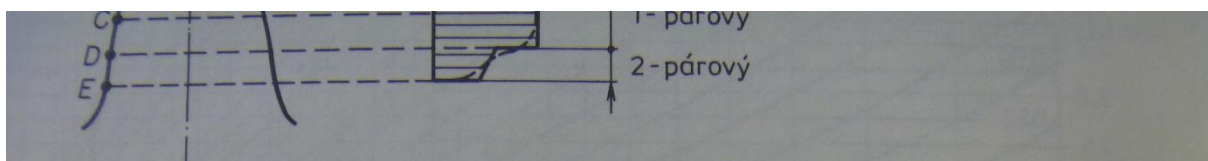
- Příloha 1 Graf součinitele tvaru zubu Y_F [8]
- Příloha 2 Graf součinitele trvání záběru evolventy [8]
- Příloha 3 Graf přípustného ohybového napětí v patě zubu [8]
- Příloha 4 Graf součinitele tvaru zubu Z_H [8]
- Příloha 5 Hodnoty modulu pružnosti v tahu a graf přípustného Hertzova tlaku [8]
- Příloha 6 Tabulka hodnot ozubení

PŘÍLOHA 1



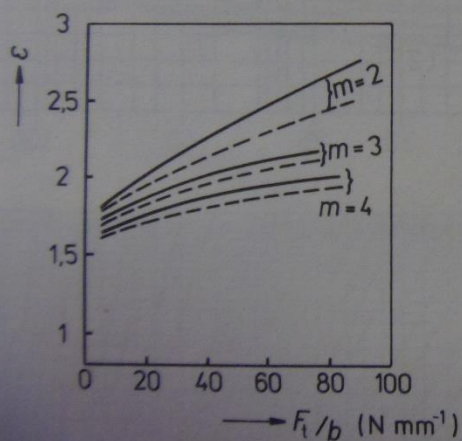
Graf součinitele tvaru zubu Y_F [8]

PŘÍLOHA 2



Obr. 149. Příklad rozdělení zatížení evolventního zubu v průběhu záběru

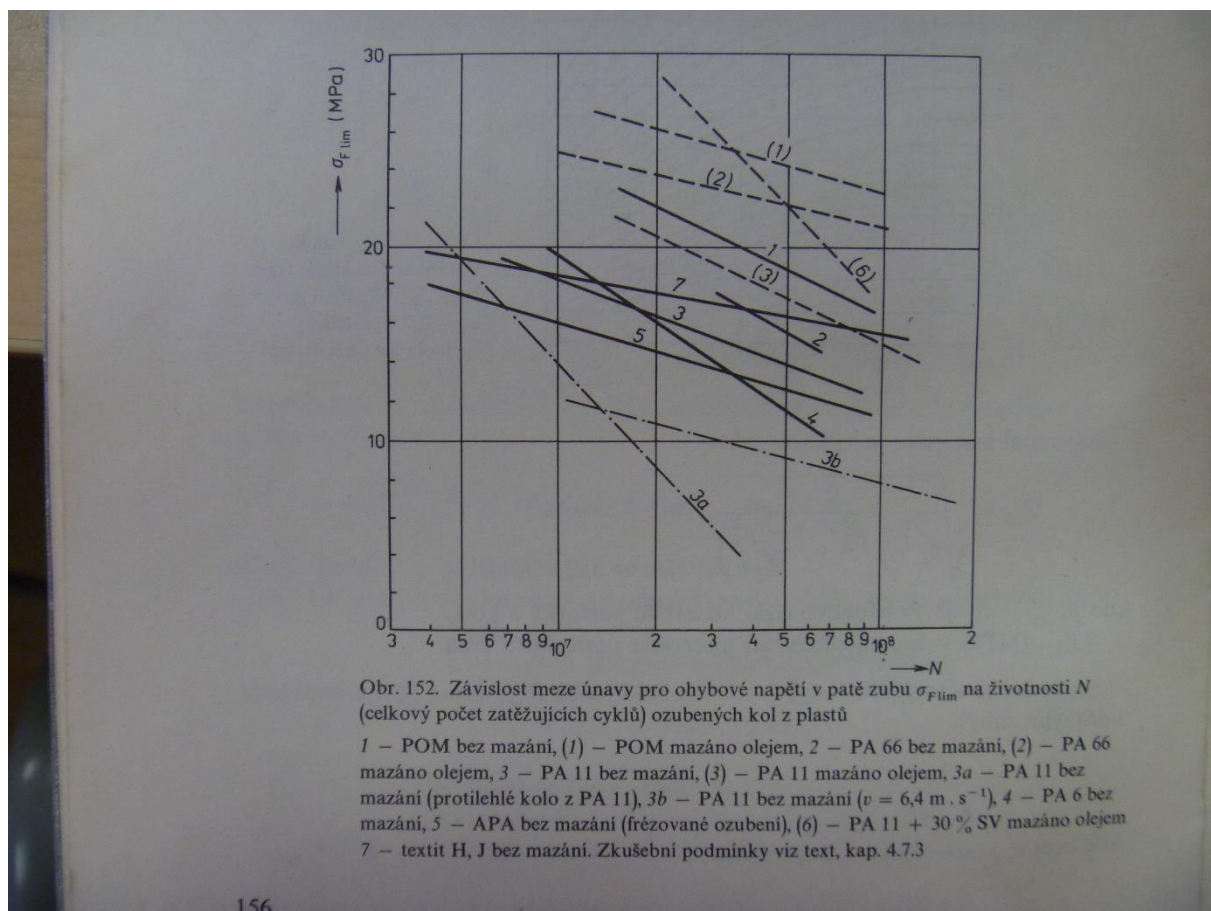
A – počátek záběru (na hlavové kružnici), B – vnější bod osamělého záběru, C – valivý bod (u nekorigovaného ozubení je na roztečné kružnici), D – vnitřní bod osamělého záběru, E – konec záběru (na hlavové kružnici protikola), — teoretický průběh zatížení vzhledem k proměnlivé tuhosti zubů při záběru, — — — průběh zatížení vlivem deformace málo tuhých zubů



Obr. 150. Zvětšení součinitele trvání záběru v závislosti na zatížení zubů u čelního ozubeného kola z POM [94]. Převod asi 1 : 1, teplota ozubeného kola asi 60 °C, protilehlé kolo z oceli. Zkoušená kola: $m = 2$, $z = 49$; $m = 3$, $z = 33$; $m = 4$, $z = 23$; — v klidu — — — při 1 000 až 2 000 otáčkách za minutu

Graf součinitele trvání záběru evolventy [8]

PŘÍLOHA 3

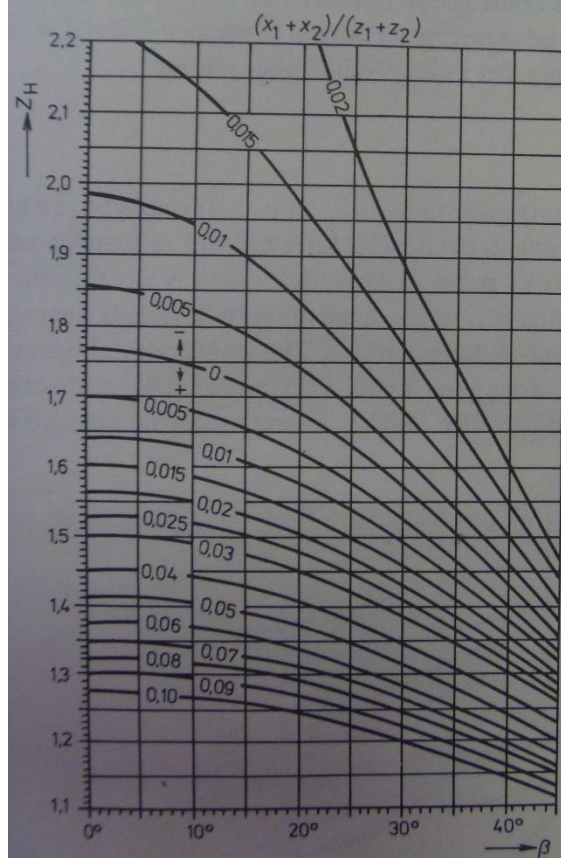


156

Graf přípustného ohybového napětí v patě zubu [8]

PŘÍLOHA 4

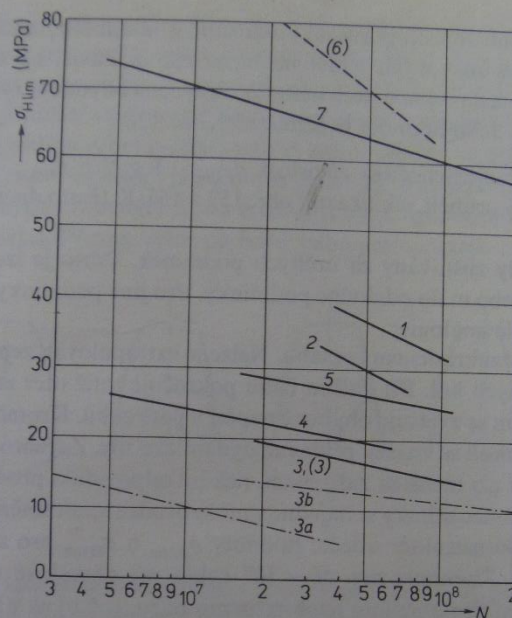
...dová síla F_t se dosazuje stejně jako při výpočtu ohybového namáhání.
 ...nitel tvaru zubu Z_H se stanoví podle ČSN 01 4686 – 6. díl, výpočtem, nebo se
 ...diagramu na obr. 151.



Obr. 151. Diagram ke
 stanovení součinitele tvaru
 zubu Z_H [93]. Platí pro
 $\alpha_n = 20^\circ$. Vysvětlivky
 symbolů viz ČSN 01 4686 –
 3. díl

Graf součinitele tvaru zubu Z_H [8]

PŘÍLOHA 5



Obr. 153. Závislost meze únavy pro Hertzův tlak σ_{Hlim} ve valivém bodě na životnosti N (celkový počet zatěžujících cyklů) ozubených kol z plastů (číselná označení křivek jsou stejná jako na obr. 152)

Materiál	E (MPa)	μ
ocel	210 000	0,3
textit H (hrubá tkanina)	4 500	0,3
textit J (jemná tkanina)	3 800	0,3
POM	1 400	0,4
PA 66	900	0,4
PA 6	500	0,4
PA 11	300	0,4
PA 11 + 30 % SV	4 000	0,3
APA	900	0,4

Tabulka 29. Hodnoty modulu pružnosti v tahu E a Poissonova čísla μ pro výpočet Hertzova tlaku ve valivém bodě σ_{Hlim} u ozubených kol z plastů

Hodnoty modulu pružnosti v tahu a graf přípustného Hertzova tlaku [8]

PŘÍLOHA 6

Modul		m	2
Počet zubů		z	23
Normální základní profil		-	
Úhel sklonu boční křivky zubu		β	°
Smysl stoup. boční křivky zubu		-	-
Jednotkové posunutí		x	0
Stupeň přesnosti podle		-	
Kontrolo- vané mezní úchytky	dvoubokého odvalu za otáčku		F''i
	dvoubokého odvalu za rozteč		f''i
	sklonu zubu		F
	vzdálenosti os		f
Kontrolní rozměr	mezní úchytky jm. vzdál. os	horní	Ea''s
		dolní	Ea''i
	přes zuby		-
Spoluzabí- rající kolo	číslo výkresu		-
	počet zubů		z
	vzdálenost os		a _w
Modul čelní		m _t	
Počet zubů hřebenu, segmentu		z	
Průměr hlavové kružnice		d _b	50
Průměr roztečné kružnice		d	46
Průměr patní kružnice		d _f	41
Úhel sklonu boční křivky zubu na základním válci		β	°
Úhel os		Σ	0°

šířka ozubení b= 10 mm

Tabulka hodnot ozubení